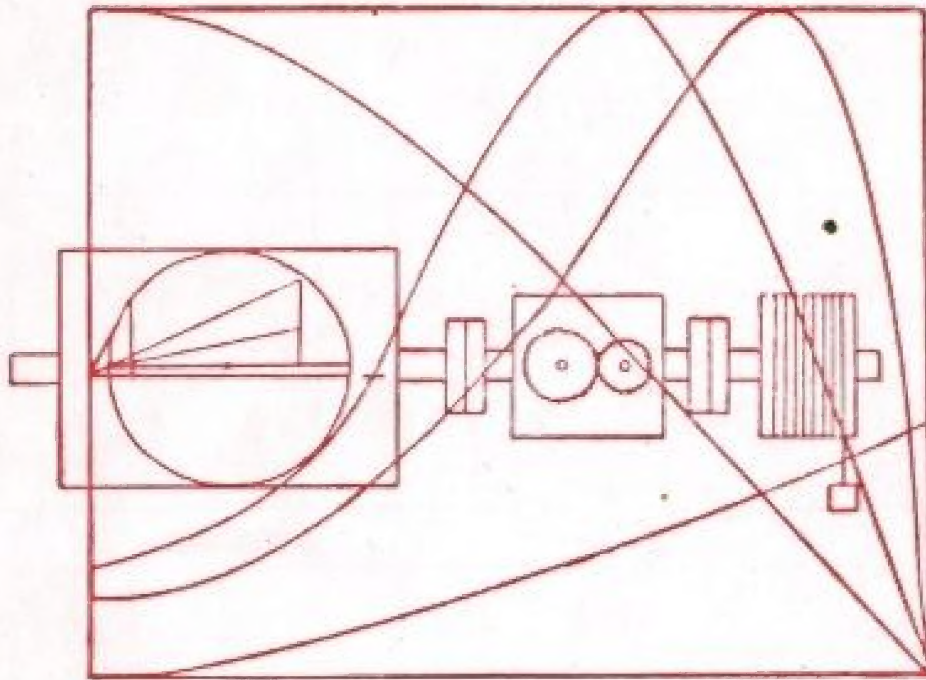


مجموعة الكتب الهندسية

المحركات التآثيرية

ومبادئ التحريك الكهربى



دكتور مهندس

محمد أحمد ممر

أستاذ الآلات الكهربائية

ورئيس قسم الخدمة الكهربائية

كلية الهندسة - جامعة الإسكندرية

الناشر // مكتبة الفيلادلفيا بالإسكندرية

جلال حذى وشركاه

المحركات التآثيرية

ومبادئ التحريك الكهربى

دكتور مهندس

محمد أحمد ممر

أستاذ الآلات الكهربائية

ورئيس قسم الهندسة الكهربائية

كلية الهندسة - جامعة الإسكندرية

الناشر // مستعار بالاسكندرية

جلال حذى وشركاه

1875

1875

1875

1875

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

رَبَّنَا لَا تَوَاخِذْنَا إِنْ نَسِينَا أَوْ أَخْطَأْنَا

مصدق اسد اعظم

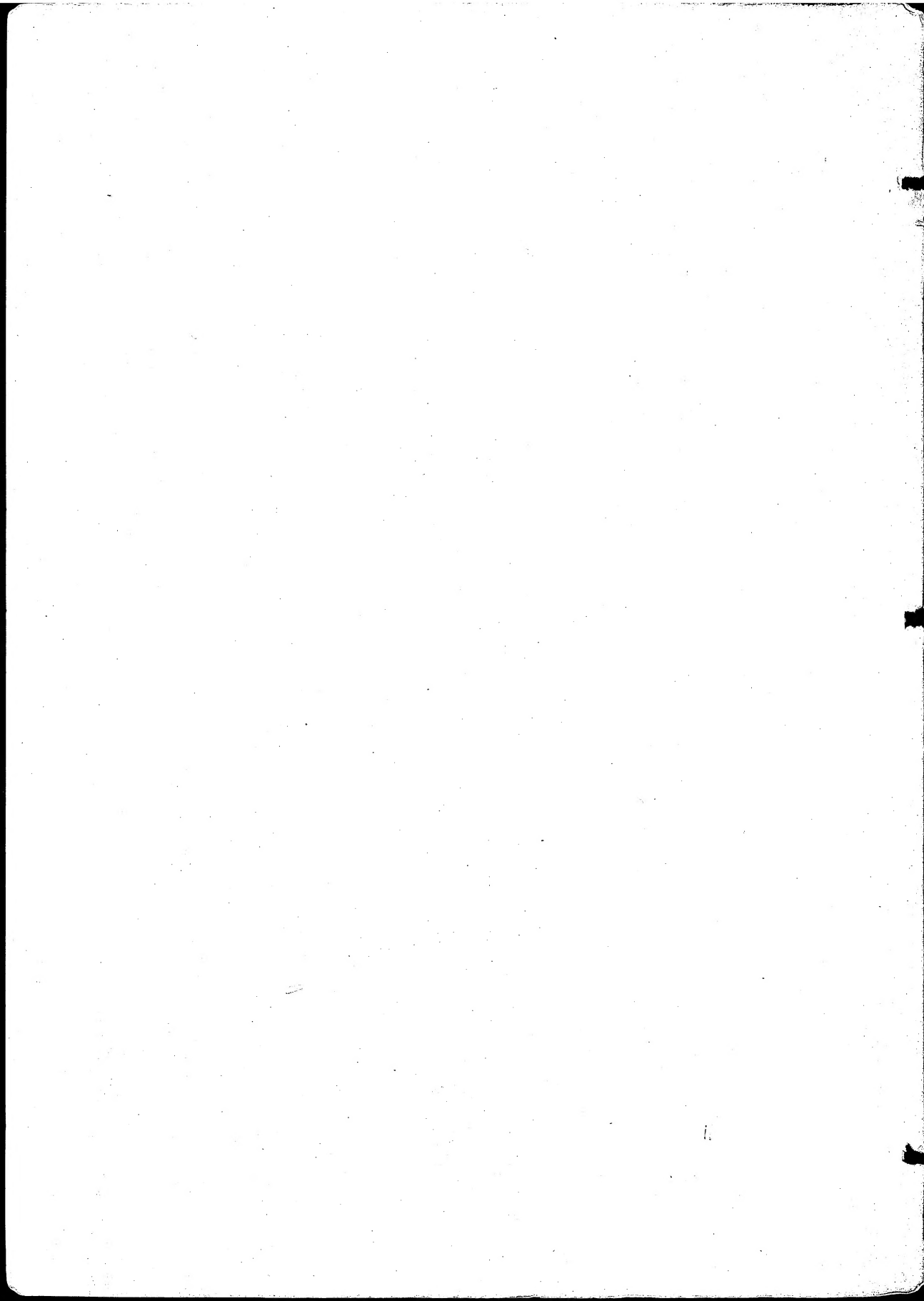
مقدمة الكتاب

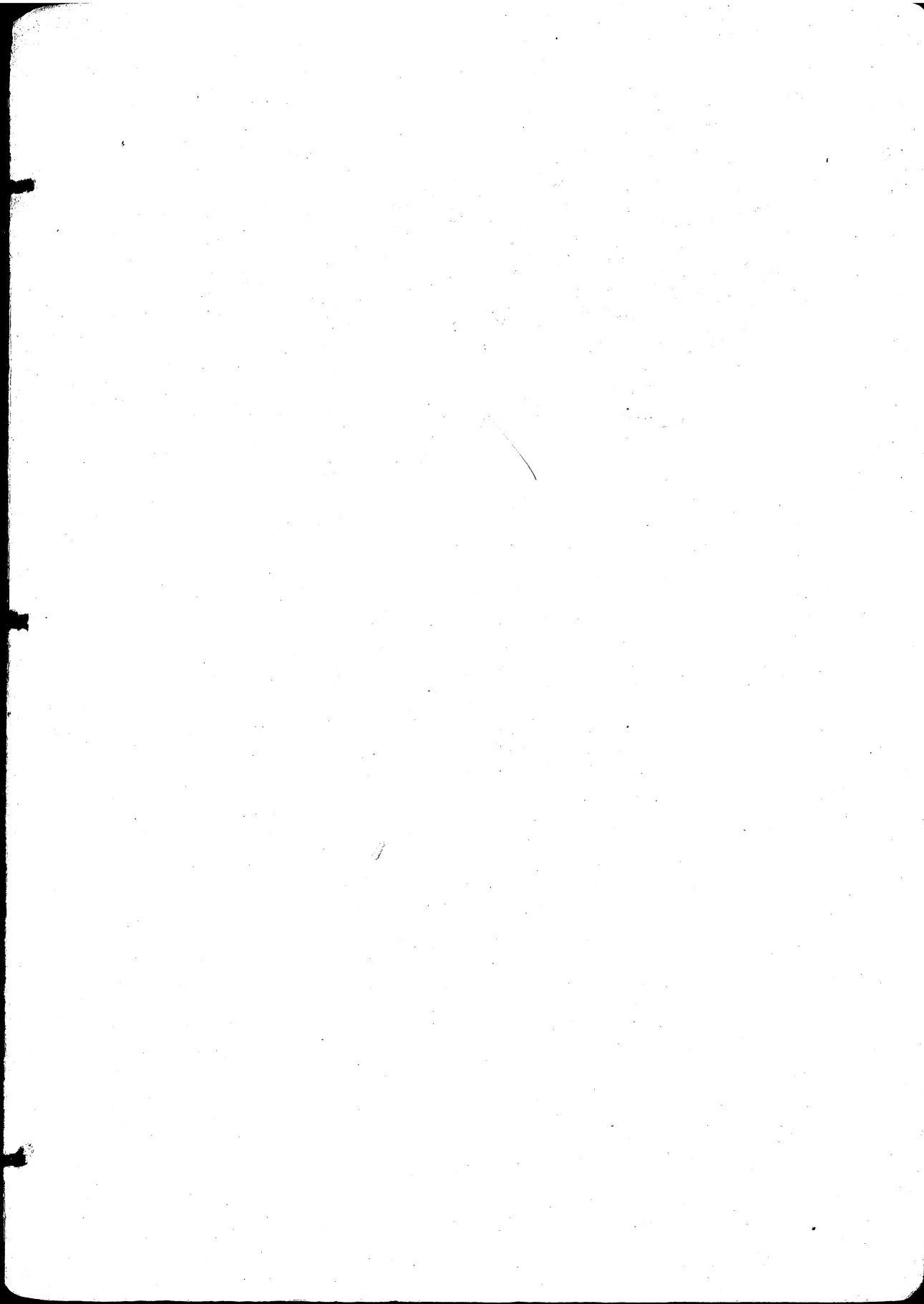
هذا هو الكتاب الثالث في سلسلة الكتب ، التي تستهدف دراسة المعلومات الأساسية في الآلات الكهربائية ، والتي طلبت من الله أن يوفقني في تأليفها باللغة العربية ، وأسأله سبحانه وتعالى أن يعطيني القدرة على استكمالها قبل أن يحين الأجل ، فيسبح على نعمة أن أترك من ورثتي علم ينتفع به .

ولقد ظهر الكتاب الأول ، وهو هندسة الآلات الكهربائية في عام ١٩٧٢ ، ثم ظهر الكتاب الثاني وهو نظريات وتصميم الآلات الكهربائية في عام ١٩٧٣ . ولم يكن مني نشاط غير ملحوظ أن يظهر الكتابان الأولان في عامين متتاليين ، كما أنه لم يكن تقاعس مني غير مقصود أن يتأخر ظهور الكتاب الثالث حتي عام ١٩٧٨ . فقد سبق البداية استعداد وتحفز تراكم معها عمل دائب طوال سنين ، كما أنه كان ولا بد من فترة تروى ، تستجمع فيها الأنفاس ، ويشاهد خلالها خط التجربة من النجاح ، فاما الاقدام بناء على ذلك ، أو التذرع بالصمت الحكيم .

ثم ظهر أن التجربة كانت والحمد لله ناجحة نجاحاً كبيراً ، وتزايد الطلب على المؤلفين في الفترة الأخيرة ، مما زاد من تحمسي لاجراء المؤلف الثالث ، كما تأكد اقتناعي بمدى ما يمكن أن يعود على أبنائنا من فائدة عظيمة إذا ما درسوا العلوم التكنولوجية بلغة امهاتهم التي اتقنوها ، ودرجوا على فهمها واستخدامها في التعبير عن أفكارهم ، منذ أن شبوا عن الطوق .

وقد قلت في بحث في موضوع الترجمة والتأليف والتعليم باللغة الوطنية ، قرأته في المؤتمر الأول للتضامن الاسلامي في مجالات العلم والتكنولوجيا ، الذي انعقد في مدينة الرياض بالمملكة العربية السعودية أثناء شهر ربيع الأول من عام ١٣٩٥ هـ :





«إن الكتاب سفير صامت، ولكنه مفصّل ومبين . وهو يمكن أن يكون واسع الانتشار ، سهل التداول ، كما يمكنك أن تصل ، بما يحتوي عليه من رأى وفكر ، إلى عقول أناس قد أقيم بينك وبينهم ستار بأى شكل ، وبأى طريق . وقد يكون الكتاب فى حد ذاته إحدى طرق التعليم الفعالة ، وهو معلم يسهل التعامل معه ، ولكن لا يتيّس استيعاب ما يحتويه من معلومات إلا بعد إتقان اللغة التى كتب بها إتقاناً تاماً . وقد أصبحت الكتب العلمية والتكنولوجية ، على هذا الأساس ، وسيلة لنشر اللغات القومية ، وهكذا فأصبح العرف السائد بين الأقوام الناطقين بلغات مختلفة ، ان كنت تريد أن تستفيد من تقدمنا العلمى والتكنولوجى ، فلتتعلم لغتنا وتتنقها أولاً ، وقبل كل شيء . وحرام علينا أن نحرم لغتنا العربية الاصلية من هذه الوسيلة الفعالة ، لنشرها والدعاية لها ، بأن ننصرف الى تأليف الكتب باللغات الأجنبية ، فى المجالات العلمية والتكنولوجية التى تقدر عليها ، وما أكثر ما نقدر عليه والحمد لله فى هذا السبيل .»

كما قلت أيضاً ان الشعوب تميل بفطرتها الى التمسك بلغاتها القومية ، والاعتزاز بها والعمل على احياء تراثها ، لو كان لها تراث ، وانماؤها ، بالتأليف بها فى مختلف نواحي العلوم والفنون والآداب ، والترجمة اليها من اللغات الاخرى على قدر الإمكان . - سمع عن جدل ثار بين قوم آخرين ، مثل ذلك الذى ثار ومارال قائما بيننا ، فى هذا السبيل . ولعل هذا يرجع الى اهمية اللغة العربية ، بالنسبة للغات الاخرى المعروفة ، وكونها لغة حضارة توطدت أركانها ردها طويلا من الزمان ، وكانت من الحضارات التى أثرت كل التأثير فى مصير الإنسان ، ثم قوى أعداؤها ، وأصبحوا ذوى حول وقوة ، واستعمروا بلاد الناطقين بها ، وقد حاولوا ، وما زالوا يحاولون ، حتى بعد جلائهم عن هذه البلاد ، أن تموت هذه اللغة ، وتصبح أثرا من الآثار ، وهذا هو ما تنعقد حوله آمالهم من قديم الزمان .»

لقد اتخذت الجامعات العربية في اجتماعات عديدة قرارها ، الذي لم يتغير ، بأن يكون التدريس باللغة العربية ، وما زال الكثيرون متمسكين بأهداب التدريس باللغة الانجليزية ، زعماً منهم بعدم وجود المراجع الكافية باللغة العربية. ولعمري متى نهتم بتنفيذ قراراتنا باتخاذ الخطوات الحاسمة التي تضمن سرعة هذا التنفيذ ، ولن يكون ذلك إلا بثورة تأليف باللغة العربية ، كما فعل قبلنا بلغتهم قوم آخرون.

هذا ولقد سرت على نفس النمط في تأليف هذا الكتاب ، كما فعلت في الكتابين السابقين ، من حيث طريقة عرض الموضوعات وتسلسلها واتباع كل موضوع بالامثلة المحولة التي تساعد على فهمه واستيعاب التطبيقات الخاصة به، حتى تكون الدراسة على أساس تكنولوجيا سليمة.

ولا يسعني في ختام هذه الكلمة الا أن أذكر بالتقدير الجهد الكبير، الذي يبذله الناشر منشأة المعارف بالاسكندرية (جلال حزي وشركاه) ، في مساعدتي على أداء المهمة الكبيرة التي أنطت نفسي بها ، وأن أشكر رجال مطبعة الجيزة على ما قاموا به في هذا السبيل ، وكل من عاون في اخراج الكتاب بشكله الراهن.

نسأل الله أن يلهنا الهداية والصواب في كل ما نعمله ، انه سبحانه وتعالى ولي التوفيق.

الاسكندرية في شهر رمضان ١٣٩٨ الموافق أغسطس ١٩٧٨.

دكتور محمد احمد قمر

الباب الأول

المبادئ الأساسية للمحركات التأثيرية ثلاثية المراحل

(Basic principles of three phase induction motors)

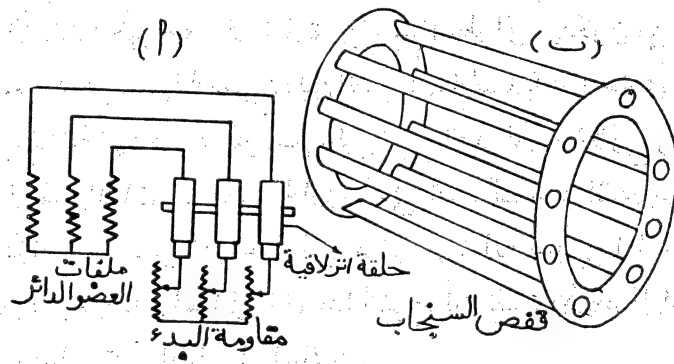
(١ - ١) تكوين المحرك التأثيري ثلاثي المراحل :

(Construction of the 3 - phase induction motor)

يتكون المحرك التأثيري ثلاثي المراحل ، أساساً ، من عضو ثابت (stator) وعضو دائر (rotor) . ولا يختلف العضو الثابت للمحرك ، في مظهره العام (general appearance) ، أو من حيث تركيب أجزائه المختلفة ، عن العضو الثابت للآلة المتزامنة ، كما سبق وصفه في الباب الأول من كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربائية . فهو عبارة عن جسم اسطوانى ، يتكون من رقائق الحديد المعزولة عن بعضها البعض لتقليل المفقودات الحديدية ، به مجارى تحتوى على ملفات ثلاثية المراحل ، لتوصيلها إلى ينبوع التيار المتردد ثلاثي المراحل . ويكون ترتيب الملفات ، في هذه المجارى ، على نفس النمط ، الذى يتم به في الآلات المتزامنة ، و بنفس القواعد ، التى تم شرحها بالتفصيل في الباب الأول الذى سبق ذكره وقد راعينا في أثناء هذا الشرح أن نلفت الأنظار إلى المواطن التى يختلف فيها ترتيب الملفات في الحالتين .

أما بالنسبة لتكوين العضو الدائر ، فيوجد نوعان مختلفان في تكوينهما ، وإن كانت خواصهما الكهربائية متقاربة جداً . ويتسمى المحرك عادة باسم عضوه الدائر ، للتمييز بين نوعين من المحركات التأثيرية ثلاثية المراحل ، هما المحركات ذات الحلقات الانزلاقية (Slip-ring motors) ، والمحركات ذات القفص السنجابى (Squirrel-cage motors) . ويتكون العضو الدائر في المحركات ذات الحلقات الانزلاقية من جسم اسطوانى من رقائق الحديد ، المعزولة عن بعضها البعض ، به مجارى ، ويشبه في تكوينه ، على هذا النحو ، المنتج في آلة

التيار المستمر . وتحتوى المجارى ، فى هذه الحالة ، على ملفات ثلاثية المراحل ، يتم ترتيبها فى المجارى على نحو مماثل لترتيب الملفات فى العضو الثابت ، ونخضع لنفس القواعد . لذلك يطلق على مثل هذا العضو الدائر أحيانا اسم العضو الدائر الملفوف (Wound rotor) . ويكون توصيل المراحل فى ملفات العضو الدائر على شكل دلتا أو نجمة ، على حسب الأحوال ، كما توصل الأطراف ، فى الحالتين إلى ثلاث حلقات انزلاقية ، راكبة على نفس عمود الادارة (shaft) للمحرك ، وتدور معه ، ومن ثم جاءت تسمية هذا النوع من المحركات بأنها ذات الحلقات الانزلاقية . ويمكن توصيل ملفات العضو الدائر ، بناء على ذلك ، إلى أية دائرة خارجية ثلاثية المراحل (3 - phase external circuit) ، مثل مقاومة ثلاثية المراحل شكل (١ - ١) ، عن طريق الفرش الراكبة فوق الحلقات الانزلاقية .



(شكل ١ - ١)

وبذلك يمكن تغيير خواص تشغيل هذا النوع من المحركات ، على نطاق واسع ، عن طريق الدوائر الخارجية المختلفة ، التى يتم توصيلها إلى ملفات العضو الدائر ، ويمكن التحكم فى مكوناتها على النحو المطلوب ، كما سيزر ذكره فيما بعد .

أما النوع الآخر من المحركات التأثيرية ، وهى ذات القفص السنجابى ،

فإن عضوها الدائر يتكون من جسم اسطوانى من زقاق الحديد، وبه مجارى، على النحو السابق وصفه فى النوع الأول. ولكن، بدلا من الملفات ثلاثية المراحل، التى توجد فى مجارى النوع الأول، تمتليء هذه المجارى بقضبان (bars)، من النحاس أو من الألومنيوم، تصب فيها عادة، وتتصل أطرافها، من كل ناحية، بحلقة متينة (stout ring) من نفس معدن القضبان، بحيث تشبه القضبان والحلقتان، فى تكوينها على هذا النحو، قفص السنجاب (Squirrel cage)، شكل (١ - ١ ب). ومن ثم جاءت تسمية هذا النوع من المحركات بأنها ذات القفص السنجابى. ولا يمكن، بعد اتمام صنع هذا النوع من المحركات، التوصل إلى قفص السنجاب، وربطه بأية دائرة خارجية. لذلك يكون تغيير خواص تشغيل هذا النوع من المحركات التأثيرية، عندما يراد ذلك، عن طريق العضو الثابت، حيث لا توجد وسيلة للوصول إلى قفص السنجاب (there is no accomodation to the Cage)، بعد اتمام صنع المحرك. وفى مقابل ذلك، فإن قفص السنجاب يتواءم مع أى عدد من الأقطاب، أو المراحل، للملفات العضو الثابت، ويعطى المحرك، فى هذه الحالة الخواص الكهربية للمحرك ذى الحلقات الانزلاقية المناظر الذى يحتوى على عضو ثابت مماثل.

(١ - ٢) طريقة عمل المحرك، بدون حمل :

(Method of operation of the motor without load)

عند توصيل ملفات العضو الثابت، ثلاثية المراحل، إلى يذبوع تيار متردد ثلاثى المراحل، يتولد مجال مغناطيسى دائر، بنفس الطريقة التى تم شرحها فى حالة المحرك المتزامن ثلاثى المراحل، يدور بسرعة التزامن n_s لفة فى الدقيقة، التى ترتبط بتردد اليذبوع f ذبذبة فى الثانية وعدد أزواج الأقطاب p الذى أعدت على أساسه الملفات، بنفس العلاقة المعروفة $f = \frac{pn_s}{60}$. ويكون هذا المجال المغناطيسى الدائر متشابكا مع كل ملفات العضو الثابت وملفات العضو

الدائر (أو قضبان ققص السنجاب) للمحرك ، وهو يشبه في طبيعة عمله المجال المغناطيسي المتبادل بين الملف الابتدائي والملف الثانوى للمحول .

وفى الواقع أن المحرك التأثيرى ، بتركيبه الذى سبق شرحه ، لا يفترق عن المحول إلا فى اختلاف تكوين الدائرة المغناطيسية ، التى تحتوى فى هذه الحالة على ثغرة هوائية كبيرة ، وهى تلك التى توجد بين العضو الثابت والعضو الدائر . وتكون ملفات العضو الثابت هى الملفات الابتدائية ، التى توصل إلى اليزنوع ، وملفات العضو الدائر هى الملفات الثانوية ، التى تكون مقصورة على نفسها ، فى الأحوال العادية لتشغيل المحرك ، أو من خلال دائرة كهربية ، ذات ترتيب خاص ، لتعديل خواص تشغيل المحرك ، وذلك فى حالة المحركات ذات الحلقات الانزلاقية ، كما سبق ذكره . ويمكننا أن نعتبر أن المحرك يعمل ، على هذا النحو ، على نمط محول ذى ملف ثانوى مقصور ، ونستفيد من نظريات المحول ، التى استنبطناها فى هذا المضمار ، وبالأخص على أساس وجود دائرة مكافئة كما سيرد ذكره فيما بعد .

إذا فرضنا أن الضغط المرحلى لليزنوع ذو شكل جيبي ، وأن تيار المغطسة الذى يمر فى ملفات المحرك ، عندما يدور بدون حمل ، ذو شكل جيبي أيضاً ، بمعنى أننا سوف نهمل التوافقيات الزمنية فى منحني التيار ، فإنا نحصل على فيض مغناطيسي ذى توافقيات أساسية تدور فى الاتجاه الموجب بسرعة التزامن n_s ، وتوافقيات عالية ذات سرعات متباينة ، كما تم شرحه على أساس المعادلة (٥ - ٣) صفحة ١٠٩ من كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربائية . وسوف نهمل هذه التوافقيات العالية ، فى الوقت الراهن ، ونكتفى بشرح طريقة عمل المحرك ، وخواصه الكهربائية ، على أساس وجود الفيض المغناطيسي للتوافقيات الأساسية ، تسهلاً للأمور ، ولأن تأثير التوافقيات العالية لا يكون ذا أهمية تذكر ، إلا فى حالات خاصة تتغير فيها خواص تشغيل المحرك تغيراً ملحوظاً ، وسوف نتناولها بالتفصيل فى حينها المناسب . هذا ،

وسوف نبني كل النظريات القادمة على أساس أن الفيض المغناطيسي للتوافقية الأساسية لمنحنى القوة الدافعة المغناطيسية للملفات المنتج ، وهو الذي يدور في الاتجاه الموجب بالنسبة لهذه الملفات بسرعة التزامن n_s لفة في الدقيقة ، هو فيض متبادل ، يتشابه مع ملفات العضو الثابت ، وملفات العضو الدائر ، تشابها تاما ، وقيمتها Φ_m خط لكل قطب ثابتة تماما ، ولا تتأثر بالحمل .

تتولد ، بناء على ذلك ، قوة دافعة كهربية مضادة E_1 ، في كل مرحلة من ملفات العضو الثابت ، تكون قيمتها ، على حسب المعادلة (٢-٢) صفحة ٥٦ ، من كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية ، كما يأتي :

$$E_1 = 4.44 f_1 T_1 \Phi_m k_{w1} \times 10^{-8} \quad \text{V} \quad (1-1)$$

حيث T_1 هي عدد اللفات في كل مرحلة من ملفات العضو الثابت ، f_1 تردد اليذبوع بالذبذبة في الثانية $\left(\frac{pn_s}{60}\right)$ و k_{w1} معامل اللف في العضو الثابت .

عندما يكون العضو الدائر في حالة السكون (rotor at standstill) ، لأول وهلة ، فإن نفس الفيض المغناطيسي Φ_m يدور بسرعة التزامن n_s بالنسبة للملفات ، فيولد فيها قوة دافعة كهربية سكونية (أى والعضو الدائر في حالة السكون) مقدارها E_{20} (Standstill e. m. f.) ، نحصل عليها باستخدام نفس المعادلة ، باعتبار أن T_2 هي عدد اللفات في كل مرحلة من ملفات العضو الدائر (في حالة قفص السنجاب توجد قيمة مكافئة لـ T_2) و k_{w2} معامل اللف في العضو الدائر ، حيث :

$$E_{20} = 4.44 p \frac{n_s}{60} T_2 \Phi_m k_{w2} \times 10^{-8} = 4.44 f_1 T_2 \Phi_m (1-2) \\ \times k_{w2} \times 10^{-8}$$

ويكون تردد E_{20} ، وتردد التيار الناشئ عنها هو $f_{20} = p \frac{n_s}{60}$ مساويا لتردد اليذبوع f_1 .

نظراً لأن ملفات العضو الدائر تكون مقصورة (وبالمثل قفص السنجاب بطبيعة تكوينه) يتولد تيار تأثيرى (بفعل القوة الدافعة الكهربائية E_{20} الناتجة بالتأثير ، ومن ثم جاء اسم المحرك) ، فتصبح موصلات العضو الدائر (أو قضبان قفص السنجاب) الحاملة لهذا التيار التأثيرى موجودة فى هذا المجال الدائر Φ_m ، فينشأ عزم دوران معين على هذه الموصلات ، تتوقف قيمته على قيم التيارات المارة فى هذه الموصلات ، وعلى Φ_m ، وكذلك زاوية الاختلاف المرحلى بينها . وبتطبيق قانون لنز ، للحصول على اتجاهات التيارات فى الموصلات ، ثم تحديد اتجاه عزم الدوران الناشئ ، بناء على ذلك ، سوف تجد أن عزم الدوران هذا يعمل على إدارة العضو الدائر للمحرك فى نفس اتجاه دوران المجال المغناطيسى الدائر . بذلك نجد أن العضو الدائر قد أصبح يدور فى اتجاه دوران المجال المغناطيسى الدائر ، وسوف يؤدى ذلك إلى نقص قيمة السرعة التى يدور بها المجال المغناطيسى الدائر بالنسبة لملفات العضو الدائر ، كلما ازدادت سرعة دوران هذا العضو . وتكون السرعة النسبية للمجال المغناطيسى الدائر مع ملفات العضو الدائر ، عند سرعة معينة n لفة فى الدقيقة ، $(n_s - n)$. وهذه السرعة النسبية ، منسوبة إلى سرعة التزامن n_s ، تعطى ما يسمى بمعامل الانزلاق ، أو الانزلاق (slip) الذى يلعب دوراً كبيراً فى تحديد خواص تشغيل المحرك ، كما سنرى فى التحليلات القادمة . ويرمز للانزلاق عادة بالرمز s ، كما يمكن أن نحصل أيضاً على الانزلاق المئوى % s ، حيث

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} , s\% = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100 \quad (١ - ٣)$$

وعندما يصل العضو الدائر إلى سرعة معينة n ، وهى تقابل انزلاق معين s ، على حسب المعادلة (١ - ٣) ، تصبح سرعة المجال المغناطيسى الدائر بالنسبة لملفات العضو الدائر $(n_s - n)$ لفة فى الدقيقة ، بعد أن كانت n_s عندما كان العضو الدائر فى حالة السكون . بذلك تتأثر قيمة القوة الدافعة الكهربائية المرحلية ، المنتجة بالتأثير فى ملفات العضو الدائر ، وكذلك ترددها

بنفس النسبة . فإذا رمزنا لقيمة القوة الدافعة الكهربائية المرحلية في ملفات المنتج عند السرعة n ، أو الانزلاق s ، بالرمز E_{2s} ، وترددها (وتردد التيارات التأثيرية الناشئة عنها أيضا) بالرمز f_{2s} ، نجد ، بناء على ذلك ، أن :

$$\frac{E_{2s}}{E_{20}} = \frac{n_s - n}{n_s} = s \quad , \quad E_{2s} = sE_{20} \quad (١-٤)$$

$$\frac{f_{2s}}{f_{20}} = \frac{f_s}{f_1} = \frac{n_s - n}{n_s} = s \quad , \quad f_{2s} = sf_1 \quad (١-٥)$$

سوف نرى ، من التحليلات الرياضية المقبلة ، أن الاستطراد الطيعي بعد ذلك ، هو زيادة سرعة المحرك إلى حد معين ، يمكننا تعيينه بتحليل الأمور بشكل عام ، ومتجاوزين عن بعض الحقائق ، التي لا تؤثر على النتيجة النهائية التي نريد الحصول عليها ، وذلك على النحو التالي : بازدياد سرعة العضو الدائر n تقل قيمة E_{2s} ، وتقل بالتالي قيمة التيار التأثيري الناشئ عنها في الملفات المقصورة ، حتى تصل n إلى قيمة قريبة من n_s ، حيث تكون قيمة عزم الدوران الناتج من تفاعل التيار التأثيري مع Φ_m قد أصبحت في تناقص مستمر ، فيتوقف ازدياد السرعة n عند الحد الذي يصبح فيه عزم الدوران هذا كافياً لإدارة المحرك ضد عزم الدوران الناشئ عن المقودات في المحرك بدون حمل . وفي الحقيقة نجد أن n تصبح في هذه الحالة قريبة جداً من n_s ، لدرجة أن الفرق بينها يعطى انزلاقاً ضئيلاً صغيراً جداً ، تختلف قيمته من 1% إلى 2% تقريباً في المحركات الصغيرة أو متوسطة الحجم ، وقد يصل 0.5% في المحركات الكبيرة . لا يختلف مخطط المتجهات للمحرك (على أساس القيم المرحلية) في شيء عن مخطط متجهات المحول وها بدون حمل ، وذلك مع تجاوز عن وجود تيار صغير جداً في الملف الثانوي (على العضو الدائر) للمحرك ، نهمل تأثيره على التيار الابتدائي في هذه الحالة . وإلى جانب ذلك فأننا نستطيع أن نعتبر ، في أحيان كثيرة ، أن سرعة دوران المحرك ، وهو بدون حمل ، هي سرعة التزامن n_s تقريباً .

R_1 هي المقاومة المرحلية للملفات العضو الثابت، و X_1 هي ممانعة التسرب المرحلية لنفس هذه الملفات، وهي محسوبة على أساس الفيض المتسرب حول ملفات العضو الثابت Φ_{L1} ، الذي يتشابه مع ملفات العضو الثابت، ولا يتشابه مع ملفات العضو الدائر، كما سبق بالنسبة للمحول X_0 و R_0 هما مركبتا معاوقة التغطس، التي نضعها من باب التقريب، كما فعلنا في حالة المحول، على طرفي الينبوع ذي الضغط المرحلي V_1 ، ويكون التيار المرحلي I_{0a} المار في R_0 هو تيار المفقودات الحديدية، و I_{0u} المار في X_0 هو تيار المغطسة المرحلي، بحيث يتكون منها تيار اللاحمل I_0 ، تماماً كما رأينا في حالة المحول.

* يكون التيار المرحلي I_{12} هو مركبة تيار الحمل المرحلي I_1 ، التي تمر في ملفات العضو الثابت لمعادلة الفيض المغناطيسي الناشئ عن التيار المرحلي التآثري المار في ملفات العضو الدائر، لكي لا يتأثر الفيض المتبادل Φ_m . وتختلف قيمتا التيارين في حالة المحرك بسبب اختلاف عدد اللفات في مرحلتى العضو الدائر والعضو الثابت كما في حالة المحول، كما تختلفان في حالة المحرك علاوة على ذلك بسبب اختلاف معاملى اللف k_{w1} و k_{w2} . وسوف نضطر إلى عمل الدائرة المكافئة للمحرك على مرحلتين: في المرحلة الأولى نجد أن القوتين الدافعتين الكهربيتين، على طرفي الملفين الابتدائي والثانوي، تظلان مختلفتين في القيمة، بسبب دوران العضو الدائر، مما يجعلنا نحصل على دائرة مكافئة يكون فيها $T_1 k_{w1} = T_2' k_{w2}$ ، بمفهوم الدائرة المكافئة للمحول، ومع ذلك لا يمكننا وصل كل طرفين متناظرين من أطراف الملفين الابتدائي والثانوي، والاحتفاظ بهما منفصلين، على نحو ما هو مبين في شكل (٢-١). وفي هذه المرحلة للدائرة المكافئة نجد أن تيار الحمل المرحلي في ملفات العضو الدائر ينسوباً إلى ملفات العضو الثابت I' يساوى I_{12} . ونحصل على I'_{2s} من I_{2s} ، وهو التيار المرحلي في ملفات العضو الدائر، على نحو ما فعلناه في حالة المحول، أى أن $I'_{2s} = I_{2s} \frac{T_2 k_{w2}}{T_1 k_{w1}}$ في حالة المحول لأن الملفات متركزة (Concentrated windings) وليست ملفات

موزعة (distributed windings) [. كذلك نجد أن العلاقة بين حدود الملف الثانوى ، المنسوبة إلى الملف الابتدائى ، كما جاءت فى شكل (٢ - ١) ، وحدوده الأصلية ، هى نفس العلاقة ، التى سبق شرحها بالتفصيل فى حالة المحول ، حيث يكون :

$$E'_{2s} = E_{2s} \frac{T_2' k' w_2}{T_2 k w_2} = s E_{20} \frac{T_1 k w_1}{T_2 k w_2} = s E'_{20}$$

$$\frac{E'_{20}}{E_1} = \frac{T_2' k' w_2}{T_1 k w_1} = 1 \quad (T_2' k' w_2 = T_1 k w_1, n = 0)$$

$$E'_{20} = E_1, \quad E'_{2s} = s E_1 \quad (١ - ٦)$$

$$R'_2 = R_2 \left(\frac{T_1 k w_1}{T_2 k w_2} \right)^2, \quad X'_{20} = X_{20} \left(\frac{T_1 k w_1}{T_2 k w_2} \right)^2 \quad (١ - ٧)$$

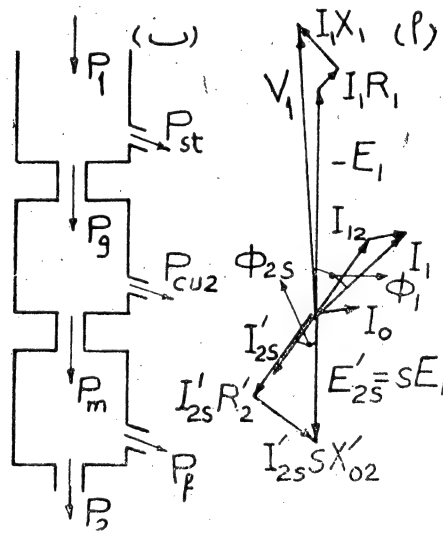
وتكون X_{20} هى ممانعة التسرب المرحلية للملفات العضو الدائر ، وهو فى حالة السكون ، وترتبط بالممانعة المناظرة ، المنسوبة للملف الابتدائى X'_{20} ، بنفس العلاقة التى حصلنا عليها فى حالة المحول كما جاء فى المعادلة (٧ - ١) لأن $n = 0$. كذلك الحال بالنسبة للمقاومة المرحلية للملفات العضو الدائر ، التى لادخل لها بالسرعه . ونظرا لان قيمة السرعة للعضو الدائر تؤثر على التردد فيه ، فان قيمة ممانعة التسرب له تتأثر بنفس الطريقة . لذلك نجد أن ممانعة التسرب المرحلية للملفات العضو الدائر X_{2s} عند أى انزلاق s ترتبط بممانعة التسرب المرحلية X_{20} لنفس الملفات فى حالة السكون بالعلاقة $X_{2s} = s X_{20}$ ، ومن ثم فان $X'_{2s} = s X'_{20}$.

نظرا لأن ملفات العضو الدائر تكون مقصورة نجد بالرجوع إلى شكل (٢ - ١) أنه عند أى معامل انزلاق s يكون :

$$I'_{2s} = \frac{E'_{2s}}{Z'_{2s}} = \frac{sE_1}{\sqrt{R_2'^2 + (sX'_{20})^2}} \quad (١-٨)$$

$$\phi_{2s} (I'_{2s}, E'_{2s}) = \tan^{-1} \frac{sX'_{20}}{R_2'} = \tan^{-1} \frac{sX_{20}}{R_2} \quad (١-٩)$$

وبالنسبة للمفات العضو الثابت نجد أن E_1 - هي مركبة ضغط اليزنوع \dot{V}_1 اللازمة لمعادلة متجه القوة الدافعة الكهربائية E_1 ، وأن $\dot{I}_1 R_1$ ، $\dot{I}_1 X_1$ ، كما هو مبين في شكل (١-٣) (مخطط متجهات المحرك وهو محل) هما مركبتا ضغط اليزنوع \dot{V}_1 اللازمتان لمعادلة هبوط الضغط في المقاومة المرحلية وممانعة التسرب المرحلية للمفات العضو الثابت. وبذلك يكون شكل (١-٣) للمحرك مناظر الشكل (٧-٨) صفحة ٣٤٣ للمحول (كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربائية).



(شكل ١-٣)

(١-٤) علاقات القدرة في المحرك المحمل : Power relations for the loaded motor)

يأخذ المحرك من الينبوع ثلاثي المراحل القدرة الكلية P_1 وات ، وهي تساوي $3 V_1 I_1 \cos \Phi_1$ ، حيث V_1 هو الضغط المرحلي للينبوع ، و I_1 التيار المرحلي في ملفات العضو الثابت عند الحمل الكامل ، و Φ_1 زاوية الاختلاف المرحلي بينها ، كما هو مبين في شكل (٣ - ١) .

تبدد ملفات العضو الثابت مفقوداتها النحاسية P_{cu1} التي تساوي $3 I_1^2 R_1$ وات ، كما تتبدد في نفس الوقت أيضا مفقودات الحديد الكلية تقريبا للمحرك P_{Fe} ، وذلك لأن مفقودات حديد العضو الدائر تكون ضئيلة جدا بسبب انخفاض قيمة التردد فيه عندما يكون الانزلاق صغيرا جدا عند الحمل الكامل ، كما سبق الإشارة إليه . وبجمع P_{cu1} مع P_{Fe} نحصل على ما يسمى بمفقودات العضو الثابت (stator losses) ، ويرمز لها بالرمز P_{st} . عند طرح P_{st} من P_1 نحصل على قيمة القدرة التي تنتقل إلى المجال المغناطيسي الدائر ، ويرمز لها بالرمز P_g أو P_{12} . هذه القدرة التي تتركز في المجال المغناطيسي الدائر تنقسم بعد ذلك إلى قسمين : القدرة الميكانيكية P_m ، التي ينقلها عمود الادارة إلى الحمل الميكانيكي ، بعد أن تتبدد منها المفقودات الميكانيكية P_f في اثناء ذلك ، والقدرة التي تأخذها الدائرة الكهربية المتمثلة في ملفات العضو الدائر ، وهي التي تبددها هذه الملفات على شكل مفقودات نحاسية لها ، ويرمز لها على هذا الاساس بالرمز P_{cu2} . ويمكن تلخيص هذا كله في العلاقات الآتية للقدرة في المحرك :

$$P_g = P_{12} = P_1 - (P_{cu1} + P_{fe}) = P_1 - P_{st}$$

$$P_g = P_{12} = P_m + P_{cu2} , \quad P_m = P_2 + P_f \quad (١ - ١٠)$$

$$P_2 (\text{قدرة المخرج للمحرك}) , \quad BHP = \frac{P_2}{746}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} , \quad P_1 = 3 V_1 I_1 \cos \Phi_1 \quad (١ - ١١)$$

$$P_{cu_2} = 3 I_{2s}^2 R'_2 = 3 I_{2s} R_2 , P_{cu_1} = 3 I_1^2 R_1 \quad (١-١٢)$$

نجد في شكل (١ - ٣) ب شكلاً تمهيطياً بين كيف تنتقص المفقودات بالتدريج من قدرة المدخل P_I . وبالرجوع إلى مخطط المتجهات في شكل (١ - ٣) نجد أن :

$$P_{12} = P_g = 3 E_1 I_{12} \cos \phi_{2s}$$

$$E_1 = E'_{20} = \frac{E'_{2s}}{S} = \frac{I'_{2s} Z'_{2s}}{S}$$

$$I_{12} = I'_{2s} , \quad \cos \phi_{2s} = \frac{R'_2}{Z'_{2s}}$$

$$\therefore P_{12} = P_g = 3 \frac{I'^2_{2s} R'_2}{s} = \frac{P_{cu_2}}{s} \quad (١ - ١٣)$$

$$\therefore P_m + P_{cu_2} = \frac{P_{cu_2}}{s} , \quad P_m = \frac{P_{cu_2}}{s} (1 - s)$$

$$\therefore P_m = P_g (1 - s) , \quad P_{cu_2} = s P_g \quad (١ - ١٤)$$

$$\therefore P_g : P_m : P_{cu_2} = 1 : (1 - s) : s \quad (١ - ١٥)$$

نستنتج من المعادلة (١ - ١٥) أن القدرة المتركرة في المجال المغناطيسي P_{12} وهي التي يطلق عليها عادة اسم قدرة الثغرة الهوائية (air gap power) ، ويرمز لها على هذا الأساس بالرمز P_g تنقسم بين القدرة الميكانيكية الكلية P_m (total mechanical power) ، وبين المفقودات النحاسية للمفات العضو الدائر P_{cu_2} بنسبة $(1 - s)$ إلى s . وهذا يعني مراعاة أن يطلق على P_2 ، تميزها عن P_m ، اسم القدرة الميكانيكية المفيدة (useful mechanical power) . تكون طبيعة تكوين المحرك بحيث يتم تشغيله عند أقل قيمة ممكنة للانزلاق

s عند الحمل الكامل، لكي نحصل على معامل جودة مرتفع . وهذا ماهو حادث فعلا بالنسبة لقيم s عند الحمل الكامل في المحركات المتداولة ، كما أشرنا إليها من قبل .

(١ - ٥) عزم الدوران : (The torque)

يتولد عزم الدوران الكلى (total torque) T بواسطة المجال المغناطيسى الدائر بالسرعة المتزامنه n_s بسبب تركيز القدرة P_g فيه . وعلى هذا الأساس يجب أن يكون $T = \frac{P_g}{2\pi \frac{n_s}{60}}$ جول . وينشأ نفس عزم

الدوران الكلى T على عمود الادارة الذى يدور بالسرعة n بفعل القدرة الميكانيكية P_m ، حيث يجب أن يكون $T = \frac{P_m}{2\pi \frac{n}{60}}$ جول . ويمكننا

على العموم ايجاد T بدلالة الانزلاق s باستخدام احدى هاتين العلاقتين ، والتعويض عن P_g من العلاقات السابقة ، وذلك على النحو التالى :

$$T = \frac{P_m}{2\pi \frac{n}{60}} = \frac{P_g (1-s)}{2\pi \frac{n_s (1-s)}{60}} = \frac{P_g}{2\pi \frac{n_s}{60}} \quad \text{جول}$$

$$= \frac{P_g}{2\pi \frac{n_s}{60} \times 9.81} \quad \text{kg.m.} \quad (١٦ - ١) \quad (\text{كجم . متر})$$

يتكون عزم الدوران الكلى T من عزم الدوران المفيد (useful torque) T_u وعزم دوران المفقودات الميكانيكية T_f . ونستفيد بعزم الدوران المفيد بأكمله في الحمل الميكانيكى ، بينما يذهب P_f هباء في المفقودات . ويمكن الحصول على عزم الدوران المفيد من قدرة المخرج P_2 ، أو القدرة القرملية BHP حيث نجد أن :

$$T_u = \frac{P_2}{2\pi \frac{n}{60} \times 9.81} = \frac{BHP \times 746}{2\pi \frac{n}{60} \times 9.81} \quad \text{kg.m.}$$

كذلك يمكن حساب T_f من المفقودات الميكانيكية P_f ، ثم حساب T_u :

$$T_f = \frac{P_f}{2\pi \frac{n}{60} \times 9.81} \quad \text{kg.m.}$$

$$T_u = T - T_f$$

هذا، ولكي نحصل على العلاقة بين عزم الدوران الكلي والانزلاق s نعوض بالعلاقات الآتية في المعادلة (١٦ - ١)

$$P_g = 3 E_1 I_{12} \cos \phi_{2s} , \quad I'_{2s} = I_{12} = \frac{E'_{2s}}{Z'_{2s}}$$

$$E'_{2s} = s E'_{20} = s E_1 , \quad \cos \phi_{2s} = \frac{R'_2}{Z'_{2s}}$$

$$\therefore T = \frac{3 E_1^2}{2\pi \frac{n_s}{60} \times 9.81} \cdot \frac{s R'_2}{R'_2{}^2 + s^2 X'_{20}{}^2}$$

$$= \frac{2 p E_1}{2 T_1 f_1 \times 9.81 X'_{20}} \cdot \frac{s \infty}{s^2 + \infty^2}$$

$$\infty = \frac{R'_2}{X'_{20}} = \frac{R_2}{X_{20}} , \quad K_t = \frac{3 p E_1^2}{2\pi f_1 \times 9.81 X'_{20}} \quad \text{kg.m}$$

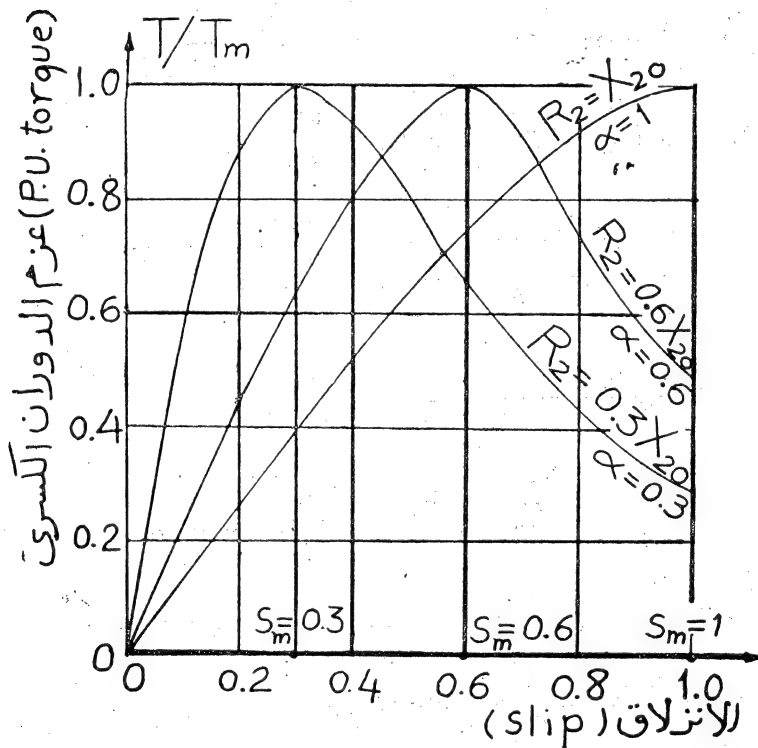
$$\therefore T = K_t \frac{S \infty}{S^2 + \infty^2} \quad \text{Kg.m.} \quad (١٧ - ١)$$

تعطى المعادلة (١٧ - ١) عزم الدوران الكلي للمحرك كدالة للانزلاق المتغير s عند قيمة معينة للثابت الاختياري ∞ . وكلما تغيرت قيمة الثابت

الاختياري (parameter) نحصل على منحنى مختلف للدالة T بتغيير s ، ونظرا لاننا نعبر K_t في معادلة عزم الدوران ثابتا مطلقا لا يتغير ، بينما

تتوقف قيمة K_t على X'_{20} ، فان تغير الثابت الاختياري $\infty = \frac{R'_2}{X'_{20}}$

يجب أن يأتي عن طريق تغيير R'_2 ، مع عدم المساس بقيمة X'_{20} (أو X_{20}) والتي تظل ثابتة على الدوام . وهذا يعني أن تظل ممانعة التسرب المرحلية للملفات العضو الدائر ثابتة بينما نأخذ قيم مختلفة لمقاومة هذه الملفات المرحلية للحصول على مجموعة من منحنيات عزم الدوران الكلي T مع الانزلاق s بقيمة مختلفة للثابت الاختياري ∞ على كل منحنى . يبين شكل (٤ - ١) مثل هذه المنحنيات باعتبار عزم الدوران النسبي $\frac{T}{T_m}$.



(شكل ٤ - ١)

يتضح من شكل (٤ - ١) أن عزم الدوران الكلى يصل إلى قيمة النهاية العظمى T_m عند قيمة معينة للانزلاق S_m . هذا ، ويمكن إيجاد قيمة كل من T_m و S_m بإيجاد التفاضل $\frac{dT}{ds}$ من المعادلة (١٧ - ١) ، ومساواته بالصفر ، على النحو التالي :

$$\frac{dT}{ds} = 0 = K_t \frac{(S_m^2 + \infty^2) \infty - S_m \times 2 S_m}{(S_m^2 + \infty^2)^2}$$

وحيث أن ∞ لا يمكن أن تساوى صفرا :

$$\therefore S_m^2 + \infty^2 = 0 \quad , \quad \therefore S_m^2 = -\infty^2 \quad , \quad S_m = \pm \infty \quad (1-18)$$

نخص الإشارة الموجبة في المعادلة (١٨ - ١) حالة المحرك التي تهمننا في الوقت الراهن ، أما الإشارة السالبة فهي خاصة بحالة المولد . وهذا يعنى أن عزم دوران المحرك يصل إلى قيمة النهاية العظمى له عند قيمة للانزلاق S_m تساوى الثابت الاختيارى ∞ . ولما كانت قيمة هذا الثابت تتحدد بتحديد قيمة معينة لمقاومة ملفات العضو الدائر المرحلية R_2 ، كما سبقت الإشارة إليه ، فأننا نستطيع تغيير موضع النهاية العظمى لعزم الدوران T_m عند الانزلاق S_m ، عن طريق تغيير قيمة R_2 (أو R_2') . وتظل القيمة T_m ثابتة في هذه الحالة نظرا لثبوت قيمة K_t (ثابتة القيمة) . بوضع $S = S_m = \infty$ في المعادلة (١٧ - ١) نحصل على قيمة T_m ، حيث :

$$T_m = K_t \frac{S_m \infty}{S_m^2 + \infty^2} = K_t \frac{\infty^2}{\infty^2 + \infty^2} = \frac{1}{2} K_t \quad (1-19)$$

$$\therefore T = 2 T_m \frac{S \infty}{s^2 + \infty^2} \quad , \quad \frac{T}{T_m} = \frac{2s \infty}{s^2 + \infty^2} \quad (1-20)$$

$$\frac{T}{T_m} \% = \frac{002s \infty}{s^2 + \infty^2} \quad (١ - ٢١)$$

تعطى المعادلة (٢٠ - ١) عزم الدوران منسوباً إلى قيمة النهاية العظمى له ، كما تعطى المعادلة (٢١ - ١) النسبة المئوية لهذا العزم ، وقد استخدمت المعادلة (٢٠ - ١) لرسم منحنيات عزم الدوران المبينة في شكل (٤ - ١) ، حيث نجد أنه عندما يكون عزم الدوران الكلى في قيمة النهاية العظمى له T_m تكون قيمة النهاية العظمى للنسبة $\frac{T}{T_m}$ تساوى الوحدة ، وتكون القيمة المناظرة لعزم الدوران المئوى 100 .

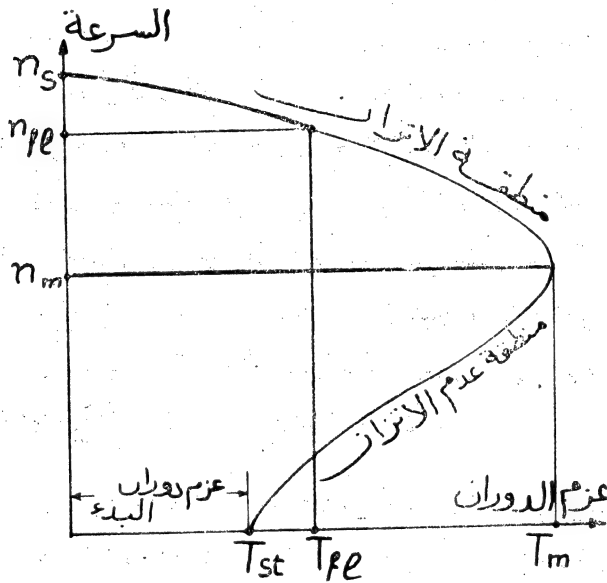
يؤدى تغيير R_2 (أو R'_2) إلى تغيير موضع النهاية العظمى لعزم الدوران عند ثبوت قيمة X_{20} (أو X'_{20}) كما ذكرنا ، بينما لا تتأثر قيمة النهاية العظمى لعزم الدوران في هذه الحالة كما تعطى المعادلة (١٩ - ١) . وقد نحتاج ، في بعض الأحيان ، أن نحصل من المحرك على عزم دوران بدء T_{st} يكون كبيراً ، مما يجعلنا نعمل على ترتيب الأمور بحيث يعطى المحرك قيمة النهاية العظمى لعزم دورانه عند البدء . وهذا يعنى أن كلا من S_m و ∞ يجب أن يصبح مساوياً للواحد الصحيح ، مما يعنى العمل على تغير قيمة R_2 حتى يتحقق هذا الشرط ، إن كانت قيمتها لا تحققه فعلاً . فإذا فرضنا أننا نحتاج إلى إضافة مقاومة قيمتها R_{st} إلى R_2 في كل مرحلة من مراحل العضو الدائر ، بتوصيلها إلى الفرش على الحلقات الانزلاقية ، نجد أن :

$$\frac{R_2 + R_{st}}{X_{20}} = \infty = 1 \quad , \quad R_{st} = X_{20} - R_2 \quad (١ - ٢٢)$$

نخرج من دراسة منحنى عزم دوران المحرك ، كما جاء في شكل (٤ - ١) بالتتابع الهامة التي يمكن تخليصها فيما يأتى :

اولاً : ينقسم المنحنى إلى جزءين مختلفين ، بالنسبة لعلاقة عزم الدوران

بالانزلاق، فمن $S = 0$ إلى $S = S_m$ يزداد عزم الدوران بزيادة قيمة الانزلاق بينما يقل عزم الدوران الذي يبذله المحرك من $S = S_m$ إلى $S = 1$. ويقال إن المحرك يمتلك خواص تشغيل متزنة (stable operation) في الجزء الأول، بينما تكون خواص تشغيله غير متزنة (unstable operation) في الجزء الثاني، كما هو مبين في شكل (٥ - ١) ، الذي تغير فيه موضع المحاور عن شكل ٤ - ١ ، وحلت السرعة محل الانزلاق على المحور الرأسى . والنتيجة



شكل (٥ - ١)

الاحتمية لوجود منطقتين منفصلتين في خواص تشغيل المحرك ، تتوفر في احدهما خاصية الاتزان وتنعدم في الأخرى ، أن نحصر على أن يظل تشغيل المحرك محصوراً في منطقة الاتزان ، فلا ينتقل منها إلى المنطقة الأخرى إلا تحت ظروف خارجة عن ارادتنا . ولكن نضع هذا الكلام في صورة أكثر وضوحاً نقول : إن أية زيادة في عزم دوران الحمل تؤدي إلى خفض سرعة المحرك بطريقة آلية ، ونؤدي بالتالى إلى زيادة قيمة الانزلاق . فإذا كان

المحرك عاملا في منطقة الاتزان بين $S = S_m$ و $S = 0$ (أى بين السرعة $n = n_s$ والسرعة $n = n_m$) ، ولم يكن انخفاض سرعته بالدرجة التي تجعله يتعدها ، فان تجاوبه مع انخفاض السرعة يكون بزيادة عزم دورانه ، بحيث يقابل الزيادة في عزم دوران الحمل . لذلك تستقر الأمور في النهاية على وضع الاتزان بين عزم دوران الحمل الجديد وعزم دوران المحرك الذى أصبح يساويه عند الانزلاق الجديد .

أما إذا كان المحرك عاملا في منطقة عدم الاتزان ، بين $S = S_m$ و $S = 1$ (أى بين السرعة $n = n_m$ والسرعة $n = 0$) وزاد الحمل عليه ، أو كان عاملا في منطقة الاتزان وكان انخفاض سرعته نتيجة الحمل عليه بحيث يندقل إلى منطقة عدم الاتزان ، فانه يتجاوب مع انخفاض السرعة بتقليل قيمة عزم الدوران الذى يسدله لمقابلة عزم دوران الحمل المتزايد ، مما يؤدي إلى ظهور عزم دوران تقصيرى على عمود الإدارة يعمل على خفض سرعة المحرك مرة أخرى . وتتوالى عملية خفض سرعة المحرك نتيجة لانخفاض قيمة عزم الدوران الذى يسدله نتيجة لخفض السرعة ، حتى يصل المحرك إلى حالة السكون ، فيصبح في حالة قصر ، وقد تسوء الأمور .

ولكى نضمن عدم انتقال المحرك من منطقة التشغيل المتزن إلى منطقة التشغيل غير المتزن نتيجة لأية زيادة مقبولة في عزم دوران الحمل (حوالى 20 % إلى 25 %) ، أو أية زيادة طارئة لا يستمر وجودها لانها تؤدي إلى فصل المحرك عن الينبوع (حوالى 50 %) ، يجب ألا تقل قيمة النهاية العظمى لعزم دوران المحرك عن ضعف عزم دوران الحمل الكامل تقريبا . بذلك يصبح خد الحمل الكامل للمحرك المبين بنقط ثقيل على منحنى عزم الدوران في شكل (٥ - ١) بعيدا بما فيه الكفاية عن حد منطقة عدم الاتزان .

ومن الواضح نتيجة لهذا الكلام كله أنه يجب أن تتوفر للمحرك ظروف البدء التي تجعله يمر بسلام من خلال منطقة عدم الاتزان ، التي يتحتم عليه أن

يمر بها اثناء فترة البدء ، حتى يصبح عاملا في منطقة الاتزان . وهذا يستدعى أن يكون عزم دوران البدء أكبر من عزم دوران الحمل المضاد على عمود الادارة بما يكفي لتعجيل العضو الدائر، بكل ما يمتلكه من قصور ذاتي (Inertia) .

فمن الواضح ، مثلا ، ان المحرك المبين منحنى عزم دورانه في شكل (٥ - ١) لا يمكن أن يقوم (starts) وعليه الحمل الكامل ، إذ أن عزم دوران البدء أصغر من عزم دوران الحمل الكامل .

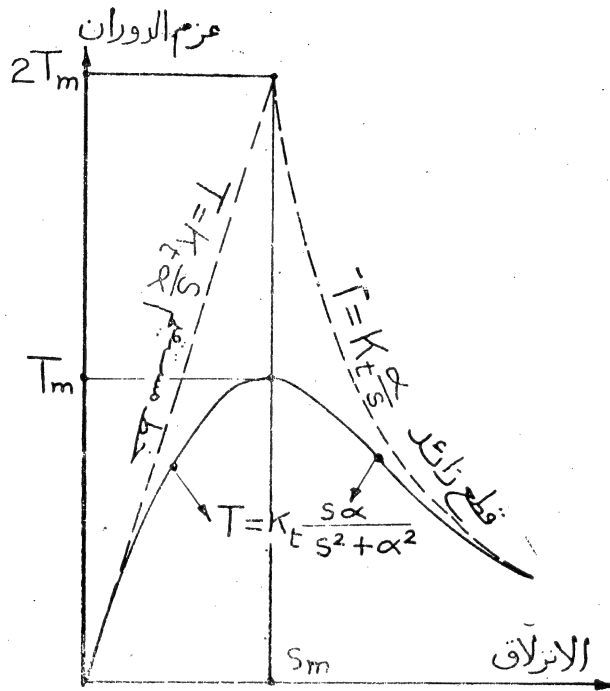
ثانيا : نحتاج في حل بعض المسائل الخاصة بتنظيم سرعة المحرك إلى علاقة بين عزم الدوران والانزلاق ، تكون أسهل تركيبا من العلاقة المعطاة بالمعادلة (١٧ - ١) . لذلك نقسم المنحنى إلى جزئين ، كما جاء في أولا ، ويكون تبسيط المعادلة لكل من الجزئين على النحو التالي :

١ - من $S = 0$ إلى $S = S_m$ نجد أن منحنى عزم الدوران أقرب ما يكون في شكله إلى الخط المستقيم ، ولو راعينا أن قيمة S في حدود الحمل الكامل تكون صغيرة بالنسبة لقيمة ∞ (على أساس أن S عند الحمل الكامل تكون حوالى نصف ∞ أو أقل قليلا على حسب ماسبق شرحه في أولا) ، نستطيع أن نهمل S^2 بالنسبة لـ ∞^2 في المعادلة (١٧ - ١) ، مما يؤدي بنا إلى الحصول على معادلة مستقيم في هذه المنطقة فعلا ، وذلك على النحو التالي :

$$T = K_t \frac{S \infty}{S^2 + \infty^2} \approx K_t \frac{S}{\infty} = \frac{K_t}{\infty} S \quad (٢٣ - ١)$$

٢ - من $S = S_m$ إلى $S = 1$ نجد أن منحنى عزم الدوران أقرب ما يكون في شكله إلى القطع الزائد (hyperbola) . وفي الواقع أننا لوراعينا أن S تكون اكبر من ∞ في هذه المنطقة ، بما يسمح لنا باهمال ∞^2 بالنسبة لـ S^2 في المعادلة (١٧ - ١) ، فإتسا نحصل بذلك فعلا على معادلة تقريبية لعزم الدوران مع الانزلاق تمثل قطعاً زائداً ، كما يأتي :

$$T = K_t \frac{S \infty}{S^2 + \infty^2} = K_t \frac{\infty}{S} \quad (١ - ٢٤)$$



(شكل ٦ - ١)

يبين شكل (١ - ٦) المنحنين الذين تمثلهما المعادلتان (١ - ٢٣) و (١ - ٢٤) مع المنحنى الأصلي ، الذي تمثله المعادلة (١ - ١٧) . ومن الواضح ، سواء بمراجعة شكل (١ - ٦) أو مراجعة القرضين اللذين أديا إلى الحصول على المنحنين الجديدين ، أن المعادلة (١ - ٢٣) تكون أكثر دقة كلما اقتربت قيمة S من الصفر ، كما أن المعادلة (١ - ٢٤) تكون أكثر دقة أيضا كلما اقتربت قيمة S من الواحد الصحيح . هذا ، وتعطى المعادلتان نتائج بعيدة عن الصحة ، بطبيعة الحال ، إذا كانت قيمة S قريبة

من S_m ، حيث نجد أن كلا منهما تعطي قيمة لـ T_m تساوي K_t عندما تكون

$$S = S_m$$

(٦ - ١) الدائرة المكافئة ومخطط الدائرة :

(The equivalent circuit and the circle diagram)

ذكرنا أننا سوف نستنبط الدائرة المكافئة للمحرك على مرحلتين ، المرحلة الأولى منهما هي تلك التي حصلنا فيها على الدائرة المكافئة المبينة في شكل (٢ - ١) ، واستخدمناها في الحصول على علاقات القدرة وعزم الدوران . ونظرا لعدم تساوي الضغط على الملفين الابتدائي والثانوي في هذه الدائرة ، فقد احتفظنا بها منفصلين مع الاكتفاء بنسبة حدود الملف الثانوي إلى الملف الابتدائي في هذه المرحلة .

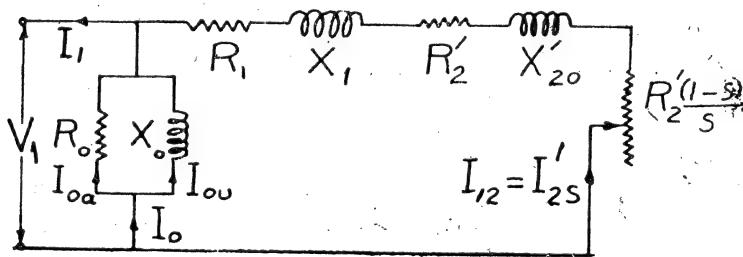
ونظرا لاختلاف الضغط من E_1 على الملف الابتدائي إلى SE_1 على الملف الثانوي ، أي بنسبة $S : 1$ في هذه الحالة ، مع تساوي التيارين وزاويتي اختلافهما المرحلي في الملفين ($I_{12} = I'_{2s}$) ، نجد أن هناك اختلافا في القدرة للملفين بنفس النسبة أيضا . وهذا ينشأ بسبب دوران الملفات الثانوية على العضو الدائر بالسرعة n مما ينتج عنه أن القدرة الميكانيكية الكلية P_m تنتقل على أساس هذه الدائرة المكافئة إلى عمود الإدارة من المجال المغناطيسي الدائر مباشرة ، دون أن يظهر لها أي أثر في الملف الثانوي ، الذي يمثل الدائرة الكهربائية للعضو الدائر .

ولكي تكتمل الصورة في الدائرة المكافئة للمحرك يجب أن تظهر فيها هذه القدرة الميكانيكية على أي شكل . ولا يتأتى ذلك إلا بالحصول على المرحلة الثانية للدائرة المكافئة ، التي يكون فيها الضغط على طرفي الملف الابتدائي مساويا للضغط على طرفي الملف الثانوي ، بحيث يمكن جذبهما

وعمل دائرة واحدة متصلة على النحو الآتى : بقسمة البسط والمقام في المعادلة (١-٨) على s نجد أن:

$$I'_{2s} = I_{12} = \frac{E_1}{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{20}'^2}} \quad (١-٢٥)$$

وهذا يعنى أننا نحصل على نفس الخواص الكهربائية للملف ثنائى فى الدائرة المكافئة فى شكل (١-٢) ، مع وجود الضغط E_1 على طرفيه بدلا من الضغط sE_1 ، إذا استبدلنا الممانعة sX_{20}' بالممانعة X_{20}' ، والمقاومة R'_2/s بالمقاومة R'_2 . وفى هذه الحالة يمكن وصل طرفى الملف الابتدائى مع طرفى الملف الثانوى ، والاستغناء عن الملفين للحصول على دائرة مكافئة متصلة ، كما سبق أن فعلنا فى حالة المحول . وهذه هى المرحلة الثانية ، والأخيرة ، للدائرة المكافئة المطلوبة ، المبينة فى شكل (١-٧) .



(شكل ١-٧)

يلاحظ أننا استبدلنا المقاومة R'_2/s بجدى المقاومة المساويين لها ، $R'_2(1-s)/s$ مضافا إليها R'_2 ، حيث أن

$$R'_2 + R'_2 \frac{(1-s)}{s} = R'_2 + \frac{R'_2}{s} - R'_2 = \frac{R'_2}{s}$$

ونظراً لأن التيار المار في المقاومة $R'_2 (1-S)/s$ هو $I_{12} = I'_{2s}$ فإن القدرة التي تستهلكها هذه المقاومة هي :

$$I_{12}^2 R'_2 \frac{(1-S)}{S} = P_m = \text{القدرة الميكانيكية}$$

وهذا يعنى أن الدائرة المكافئة الجديدة قد أصبحت تشتمل على الحد الذى يعطى القدرة الميكانيكية للمحرك ، مع تغيرها بتغير الانزلاق S . وهذا الحد هو عبارة عن المقاومة المتغيرة $R'_2 (1-s)/s$ ، التى تتغير قيمتها بتغير قيمة الانزلاق S . يمكن باستخدام الدائرة المكافئة الجديدة الحصول على قيمة التيار $I_{12} = I'_{2s}$ بدلالة ضغط الينبوع المرحلى V_1 ، وثوابت المحرك R_1, X_1, R'_2, X'_{20} ، كدالة للانزلاق S ، كما يأتى :

$$I_{12} = I'_{2s} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right)^2 + (X_1 + X'_{20})^2}} \quad (٢٦ - ١)$$

وتكون زوايا الاختلاف المرحلى ϕ_{12} لهذا التيار مع الضغط V_1 عبارة

$$\phi_{12} = \phi_{2s} = \tan^{-1} \left(\frac{X_1 + X'_{20}}{R_1 + \frac{R'_2}{S}} \right) \quad (٢٧ - ١)$$

ويمثل المحرك ، فى هذه الحالة ، دائرة كهربية بسيطة ، مكونة من ثمانية

ثابتة $(X_1 + X'_{20})$ ، ومقاومة متغيرة $\left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right)$ ، موصلة على

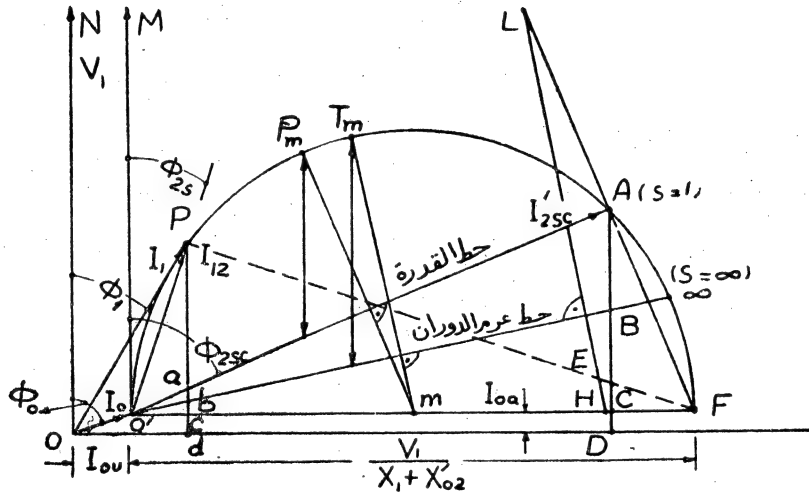
بنوع تيار متردد ذى ضغط ثابت القيمة V_1 . ويكون تمثيل التيار

بالاحداثيات القطبية (polar coordinates) ، فى هذه الحالة ، بطولية I'_{2s}

وزاوية اختلاف المرحلى ϕ_{2s} مع المحور الاساسى الذى ينطبق عليه V_1 ، كما

يكون المتغير الأصلي هو الانزلاق S .

من المعروف في علم الدوائر الكهربائية (Electric circuits) أن المحل الهندسي الذي يرسمه طرف التيار في هذه الحالة ، عندما تتغير قيمة S ، يكون عبارة عن نصف دائرة نحاول فيما يأتي إيجاد أبسط الوسائل لرسمها . فإذا اعتبرنا أن O' ، في شكل (٨-١) هي نقطة الأصل للتيار



(شكل ٨-١)

، وأن اتجاه الضغط V_1 مع اتجاه المحور الاساسي هو $O'M$ ، نجد أنه عندما تصبح قيمة المقاومة المتغيرة $R_1 + \frac{R_2'}{S}$ صفراً (وهو افتراض نظري بحث في حالة المحرك لكي يمكن رسم الدائرة) ، فإن التيار يكون متأخراً بزواياة مرحلية مقدارها 90° ، وتكون قيمته $V_1 / (X_1 + X'_{20})$ وهذه هي احدى قيمتي الحدود (boundary value) للتيار التي تمثل أقصى قيمة ممكنة للتيار ، وتحدد بذلك طول قطر نصف الدائرة المطلوبة .

فإذا اتخذنا مقياس رسم للتيار ، بحيث يمثل كل سنتيمتر واحد تياراً مقداره X أمبير ، نستطيع رسم قطر الدائرة $O'F$ ، الذي يساوي $V_1 / X (X_1 + X'_{20})$ سنتيمترات ، في هذه الحالة .

ومن الواضح أنه عندما تساوى قيمة S مالا نهاية ($S = \infty$) ، فإن قيمة المقاومة تصبح R_1 فقط ، وبذلك نستطيع أن نحصل على قيمة التيار I'_{2s} عندما تكون $S = \infty$ ، ومن ثم النقطة ∞ الموافقة لهذا الشرط على الدائرة ، حيث يكون :

$$I'_{2s}(\infty) = \frac{V_1}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_{20})^2}} \text{ A}, \quad O'\infty = \frac{I'_{2s}(\infty)}{\lambda} \text{ cms} \quad (1-28)$$

كذلك نجد أنه عندما تساوى S صفرا ، فإن قيمة المقاومة تصبح مالا نهاية ، مما يجعل قيمة التيار I'_{2s} صفرا . وهذا يعنى أن النقطة O' تمثل الوضع عندما تكون S تساوى صفرا .

يمكننا بعد ذلك تعيين أية نقطة على الدائرة تناظر أية قيمة للانزلاق S باحدى طريقتين :

١ - أن نحدد قيمة التيار المناظر I'_{2s} باستخدام المعادلة (١-٢٦) ، (وذلك باعتبار أن ثوابت المحرك R_1, R_2', X_1, X'_{20} معروفة) ، التي تحدد طول الوتر المناظر ، على حسب مقياس الرسم .

٢ - أن نحسب قيمة زاوية الاختلاف المرحلى ϕ_{2s} ، بين V_1, I'_{2s} ، وهى التي تحدد الزاوية التي يصنعها الوتر مع المحور الاساسى OM ، فيمكن بذلك تعيين النقطة المطلوبة .

من أهم التقريبات الموجودة فى الدائرة المكافئة فى شكل (١-٧) ثبوت قيمة تيار اللاحمل للمحرك ، وثبوت قيمة المفقودات الحديدية والميكانيكية ، وتيار المغطسة ، وكذلك الفيض المغناطيسى المتبادل ϕ_m . وهذه فى الواقع تقريبات لازمة إلى جانب افتراض أن ثوابت المحرك

لا تتعرض لأية تغييرات، وذلك للحصول على نظريات وقواعد سهلة الاستنباط لخواص المحرك ، تعطى نتائج ذات تقريب مقبول بالنسبة للنتائج التي نحصل عليها من المحرك عمليا . وهذا يستوجب الافتراض ضمنا بأن سرعة المحرك عند اللامحل تساوى السرعة المتزامنة ، أو بمعنى آخر أن المحرك يأخذ تيار اللامحل I_0 من الينبوع في الوقت الذي تكون فيه قيمة الانزلاق s تساوى صفرا ، وبالتالي تكون قيمة التيار $I_{12} = I'_2$ تساوى صفرا .

وهذا يدعونا إلى اعتبارا النقطة O' تمثل الوضع ، بالنسبة لقيمة التيار الذي يأخذه المحرك من الينبوع ، في حالة اللامحل (no load point) .

فإذا رسمنا OO' ممثلا لتيار اللامحل I_0 ، بزاوية اختلافه المرحلي ϕ_0 مع الضغط V_1 الذي ينطبق على المحور الأساسي الجديد ON ، نستطيع الحصول على قيمة تيار الينبوع المرحلي I_1 ، عند أية قيمة للانزلاق ، بالقياس من O بدلا من O' حتى النقطة المناظرة على الدائرة . وتحدد زاوية الاختلاف المرحلي ϕ_1 بين I_1 واتجاه V_1 أو المحور الأساسي ON .

يهمنا بعد ذلك الحصول على نقطة القصر (short circuit point) للمحرك . ونظر لأن ملفات العضو الدائر تكون مقصورة دائما ، فإن مفهوم دائرة القصر (short circuit conception) ينصب هنا على الحالة التي يأخذ فيها المحرك تيارا يكون ذا قيمة غير عادية بالنسبة لتيار الحمل الكامل ويمثل استمرار وجوده خطرا عليه . وهذه هي الحالة التي يكون فيها العضو الدائر ساكنا ، (standstill) أى عندما تكون قيمة الانزلاق تساوى الوحدة .

معنى هذا أننا نعتبر المحرك في حالة قصر عندما يظل العضو الدائر ساكنا ،

وتكون $s = 1$. ويمكن الوصول إلى نفس هذه النتيجة ، بالرجوع إلى الدائرة المكافئة للمحرك شكل (١ - ٧) ، حيث نجد أنه عندما تكون $s = 1$ فان حد المقاومة $R'_2 (1 - s) / s$ ، الذي يمثل الحمل الميكانيكي على المحرك ويمثل لذلك الحمل في الدائرة الكهربية ، يصبح مساويا للصفر ، بمعنى نشوء دائرة قصر في هذه الحالة .

من الواضح ، إذا ، أننا نستطيع الحصول على نقطة القصر $A (s = 1)$ ، على الدائرة ، عن طريق تحديد قيمة تيار القصر I'_{2sc} ، أو زاوية اختلافه المرحلي ϕ_{2sc} ، بالتعويض في المعادلة (١ - ٢٦) ، أو المعادلة (١ - ٢٧) بالقيمة $s = 1$ ، حيث نجد أن :

$$I'_{2sc} = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_{20})^2}}$$

$$\phi_{2sc} = \tan^{-1} (X_1 + X'_{20}) / (R_1 + R'_2) \quad (١ - ٢٩)$$

إذا راعينا أن المركبة الرأسية للتيار في شكل (١ - ٨) ، الذي نطلق عليه اسم مخطط الدائرة للمحرك (circle diagram) ، تمثل المركبة الفعالة له ، وأن ضغط الينبوغ المرحلي V_1 يعتبر ثابتا ، يمكننا أن ندرك أن أية مسافة رأسية على الشكل تمثل قدرة فعالة بمقياس رسم للقدرة عبارة عن أن كل سنتيمتر واحد يمثل $3 V_1 X$ وات ، على حسب التيار الذي تمثله هذه المسافة الرأسية .

فبالنسبة للمسافة الرأسية AC ، التي تمثل المركبة الفعالة لتيار القصر I'_{2sc} ، يجب أن يمثل الطول AC القدرة $3 I'^2_{2sc} (R_1 + R'_2)$. فإذا عينا النقطة B على AC ، بحيث يكون $(AB/BC) = (R'_2/R_1)$ ، فان AB يمثل مفقودات النحاس في العضو الثابت $P_{cu1} = I'^2_{2sc} R_1$ ، بينما يمثل BC

$$P_{cu2} = 3I_{2sc}^2 R'_2 \text{ الثابت في العضو النحاس}$$

وعلى هذا الاساس يكون CD ممثلاً للقدرة $I_{oa}^2 R_o$ ، أى ممثلاً للمفقودات الحديدية والميكانيكية للمحرك . وهذا يعنى أننا فصلنا المفقودات الحديدية عن مفقودات النحاس للعضو الثابت ، واضفناها إلى المفقودات الميكانيكية مع قدرة المخرج ، وهو تقريب لا بد منه أيضاً ، إلى جانب التقريبات التي سبق ذكرها ، لتسهيل الأمور ، مع عدم المساس بدرجة الدقة المطلوبة في النتائج .

بذلك يصبح AD ممثلاً لقدرة المدخل للمحرك وهو في حالة القصر ، حيث تكون A ممثلة لنقطة التشغيل ($s=1$) في هذه الحالة . ونظراً لأن قدرة المخرج P_2 تساوى صفراً في هذه الحالة ايضاً ، فإن النقطة A تقى بهذا الشرط ، على أساس أن قدرة المخرج تقاس بالمسافة الرأسية بين الخط O'A ونقطة التشغيل المناظرة على محيط الدائرة . وبناء على ذلك يطلق على الخط O'A اسم خط القدرة (power line) . يمثل AB مفقودات النحاس في ملفات العضو الدائر $3I_{2sc}^2 R'_2$ ، كما سبق بيانه ، عند $s=1$. وهذا يعنى أنه يمثل في نفس الوقت قدرة الثغرة الهوائية P_g . ونظراً لأن عزم الدوران الكلى للمحرك ، وهو عزم دوران البدء T_{st} في هذه الحالة ، يساوى $(2\pi \frac{n_s}{60} \times 9.81) P_g$ كجم . متر ، نستطيع أن نعتبر أن OA يمثل عزم دوران البدء T_{st} بمقياس رسم لعزم الدوران عبارة عن كل سنتيمتر يمثل

$$3 V_{IX} / (2\pi \frac{n_s}{60} \times 9.81) \text{ كجم . متر .}$$

وبناء على ذلك فإن المسافة الرأسية بين الخط O'B وأية نقطة تشغيل P مناظرة لانزلاق معين s على محيط الدائرة تعطى بمقياس رسم القدرة قيمة القدرة في الثغرة الهوائية P_g . كما أنها تعطى بمقياس رسم عزم الدوران

الذى يتحدد بناء على مقياس رسم القدرة والسرعة الزاوية الثابتة
 $\omega_s = 2\pi \frac{n_s}{60}$ ، عزم الدوران الكلى للمحرك . لذلك يطلق على الخط $O'B$
 اسم خط عزم الدوران (torque line) . بناء على ماسبق كله نجد أنه ،
 بالنسبة لمقاييس الرسم على مخطط الدائرة ، وبالنسبة للمعلومات التى يمكن
 أن نحصل عليها من المخطط عند نقطة تشغيل معينة P ، مناظرة لانزلاق معين
 s ، يكون :

أولا - إذا كان كل ١ سنتيمتر يمثل λ أمبير للتيار

فان كل ١ سنتيمتر يمثل $3V_1 \lambda$ وات للقدرة

كما أن كل ١ سنتيمتر يمثل $\frac{3V_1 \lambda}{2\pi \frac{n_s}{60} \times 9.81}$ كجم متر لعزم

الدوران

ثانياً يمثل $O'a$ ، بمقياس رسم التيار ، $I_{12} = I_{2s}$

يمثل Oa ، λ بمقياس رسم التيار ، I_1

يمثل $O'O$ ، بمقياس رسم التيار ، تيار اللاحمل I_0 بمركبتيه

I_{0a} , I_{0u}

يمثل Pa ، بمقياس رسم القدرة ، قدرة المخرج P_2

يمثل Pb ، بمقياس رسم عزم الدوران ، عزم الدوران الكلى T

يمثل Cd ، بمقياس رسم القدرة ، المفقودات الميكانيكية والحديدية

يمثل Pd ، بمقياس رسم القدرة ، قدرة المدخل للمحرك P_1

هذا ولا تنصح باستخدام مخطط الدائرة للحصول على المفقودات

النحاسية، فى كل من ملفات العضو الدائر ، وملفات العضو الثابت، لصغر

الأطوال الممثلة لها ، كما يستحسن عدم استخراج قيمة P_g منه أيضا ، بسبب التقريبات التي سبقت الإشارة إليها . ولكن يمكن أن نحصل منه أيضا على عزم دوران البدء الذي يمثله AB بمقياس رسم عزم دوران ، كما ذكرنا من قبل . هذا ، ويستلزم حصولنا على قيمة النهاية العظمى للقدرة ، وقيمة النهاية العظمى لعزم دوران المحرك ، أن نوجد أقصى مسافة رأسية بين كل من خطى القدرة وعزم الدوران والدائرة ، على الترتيب . ويمكن تحقيق ذلك باسقاط عمود ، من مركز الدائرة m ، على كل من الخطين ، فنحصل على النقطة P_{max} على محيط الدائرة ، التي تحدد مع خط القدرة قيمة النهاية العظمى للقدرة المحرك ، وكذلك على النقطة T_m ، التي تحدد مع خط عزم الدوران قيمة النهاية العظمى لعزم الدوران ، كما هو مبين على مخطط الدائرة في شكل (٨ - ١) .

يمكن استخدام مخطط الدائرة للحصول على قيمة الانزلاق s ، عند نقطة التشغيل المعينة ، بالرسم أيضا ، النحو التالي : يوصل FA ، ويمد على استقامته إلى أيه نقطة اختيارية مثل L . يسقط عمود على خط القدرة AB ويمد حتى يقابل قطر الدائرة OF في H . يوصل FP ، فيقطع LH في E . فتكون قيمة الانزلاق s ، عند النقطة التشغيل P ، عبارة عن النسبة $\frac{EH}{HL}$.

(٧ - ١) رسم مخطط الدائرة من بيانات التصميم :

(Drawing of the circle diagram from design data)

يمكن أن تمدنا بيانات التصميم للمحرك بالمعلومات الكافية لرسم مخطط الدائرة له ، الذي نستطيع أن نستخدمه في الحصول على خواص التشغيل المختلفة . وتشمل بيانات التصميم ، اللازمة في هذه الحالة ، ثوابت المحرك R_1, X_1, R_2, X_2 ، ونسبة التحويل بين الملفين الابتدائي والثانوي $\alpha = T_1 k_{w1} / T_2 k_{w2}$ ، ثم تيار اللاحمل I_0 وزاوية اختلافه المرحلي مع ضغط

التيوب المرحلي V_1 ، أو تيار المغنطة I_{oa} والمفقودات الحديدية والميكانيكية التي يمكن أن نستخدمها في الحصول على تيار المفقودات I_{oa} .

ويكون رسم مخطط الدائرة ، في هذه الحالة ، على نفس المنوال ، الذي سبق شرحه في البند السابق . ويلاحظ أنه عند عدم معرفة سرعة التزامن للمحرك ، نتيجة للجهل بعدد الأقطاب أو التردد ، فإننا نستطيع اتخاذ مقياس رسم لعزم الدوران بوحدة الواط المتزامن ، وهو نفس مقياس رسم القدرة بالواط . وعلى هذا الأساس فإن كل وات متزامن (synchronous watt) يساوي $(9.81 \times \frac{n_s}{60} / 2\pi)$ كجم متر .

(٨ - ١) رسم مخطط الدائرة من بيانات الاختبار :

(Drawing of the circle diagram from test data)

يمكن ، كما هو الحال بالنسبة للالات الكهربائية التي درسناها حتى الآن ، استنباط خواص تشغيل المحرك التأثري ثلاثي المراحل عن طريق عمل اختباري الدائرة المفتوحة (أو اللاحمل) ودائرة القصر للمحرك . ويتم ذلك ، في الحقيقة ، بالحصول على المعلومات اللازمة لرسم مخطط دائرة المحرك من هذين الاختبارين ، ثم استغلال مخطط الدائرة بعد ذلك لتحديد خواص التشغيل المطلوبة .

نبدأ أولاً بشرح طريقة إجراء كل من الاختبارين ، والمعلومات التي نحصل عليها منها ، ثم نستطرد بعد ذلك إلى شرح طريقة رسم مخطط الدائرة ، باستخدام المعلومات التي حصلنا عليها .

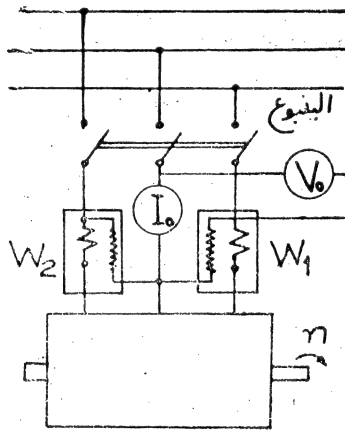
أ - اختبار اللاحمل (اختبار الدائرة المفتوحة) :

No load test (open circuit test)

إن تسمية هذا الاختبار باختبار الدائرة المفتوحة يشير إلى أننا نعتبر أن

$s = 0$ ، أو صغيرة جدا ، بحيث يصبح حد المقاومة $\frac{(1-s)}{s} R'_2$ في الدائرة المكافئة كبيرا جدا ، مما يؤدي إلى اعتبار الدائرة مفتوحة في هذه الحالة .

يوصل المحرك إلى ينوع ضغطه المعتاد (الضغط المقنن rated voltage) كما هو مبين في شكل (٩ - ١) ، وذلك عن طريق الأجهزة التي نحتاج إليها



شكل (٩ - ١)

لرصد المعلومات اللازمة ، حيث نقيس القدرة في هذه الحالة باستخدام الواتمترين فقط (هندسة الآلات الكهربائية ص ٢٠٢ و ٢٠٣) . يدار المحرك بدون الحمل ، وترصد قراءات الأجهزة ، مع مراعاة أن يكون ضغط الينوع المرحلي مساويا مقنن ضغط المحرك المرحلي بالضغط V_1 . نحصل ، في هذه الحالة ، على النتائج الآتية :

$$W_o = W_1 + W_2 \quad \text{(قدرة اللاحمل)} \quad , \quad I_o = \text{(تيار اللاحمل)}$$

$$\cos \Phi_o = \frac{W_o}{\sqrt{3} V_o I_o} , \quad V_1 = \frac{V_o}{\sqrt{3}}$$

يمكننا أن نعتبر أن W_0 تساوي تقريباً مفقودات الحديد والمفقودات الميكانيكية

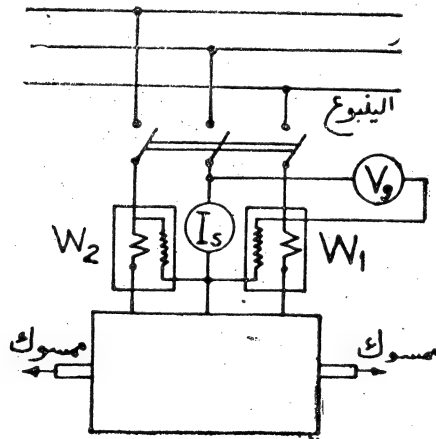
$$I_{oa} = I_o \cos \Phi_o , \quad R_o = \frac{V_o}{\sqrt{3} I_{oa}}$$

$$I_{ou} = I_o \sin \Phi_o , \quad X_o = \frac{V_o}{\sqrt{3} I_{ou}}$$

ب - اختبار دائرة القصر (short circuit test) :

يسمى هذا الاختبار ، في بعض الاحيان ، باسم اختبار العضو الدائر الممسك (locked rotor test) ، أو اختبار التسكين (standstill test) ، إذ أن أساس اجراء الاختبار أن تؤخذ القراءات والعضو الدائر في حالة السكون التام ($s = 1$) ، لأن هذا هو شرط وجود المحرك في حالة القصر ، كما سبق شرحه .

لذلك يراعى فرملة المحرك بأية وسيلة مناسبة لمنع من الدوران عند توصيله الى الينبوع ، الذي يكون ضغطه منخفضاً في هذه الحالة بحيث تكون قيمة تيار القصر في حدود قيمة تيار الحمل الكامل تقريباً . وتدخل الأجهزة اللازمة ، لأخذ القراءات المطلوبة ، في دائرة التوصيل ، كما هو مبين في شكل (١٠ - ١) .



شكل (١٠ - ١)

نحصل في هذه الحالة على قيمة تيار القصر I_s ، عند استخدام الضغط المنخفض V_s ، اللازم لاجراء التجربة بدون الحاق أية أضرار بالمحرك . ولكي نحصل على تيار القصر المعتاد للمحرك I'_{2sc} ، نفترض أن R_1, R'_2, X_1, X'_2 ثابتة القيمة ، كما سبقت الإشارة إليه ، فتكون قيمة تيار القصر للمحرك متناسبة مع قيمة الضغط المرحلي ، ونجد أن :

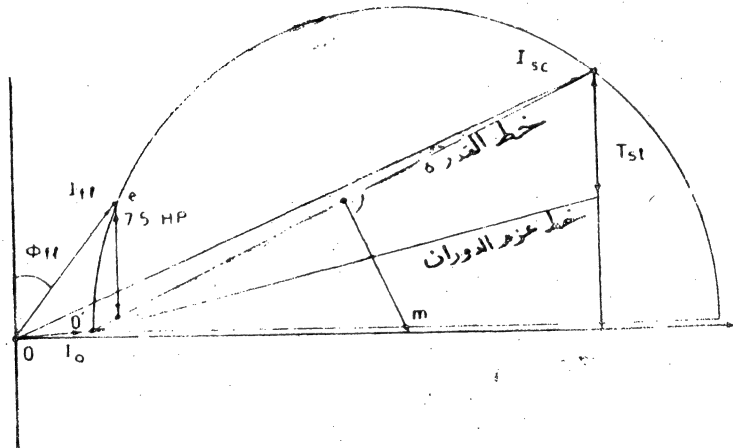
$$I'_{2sc} = I_s \times \frac{\sqrt{3} V_1}{V_s}$$

$$(\text{قدرة القصر}) \quad W_s = W_1 + W_2 , \quad \cos \Phi_{2sc} = \frac{W_s}{\sqrt{3} V_s I_s}$$

$$Z_{1eq} = \sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_{20})^2} = \frac{V_s}{\sqrt{3} I_2}$$

$$(R_1 + R_2) = Z_{1eq} \cos \Phi_{2sc}$$

وبقياس المقاومة المرحلية للعضو الثابت بأية طريقة بسيطة باستخدام التيار المستمر ، وأخذ تأثير التيار المتردد في الاعتبار ، يمكننا تحديد قيمة كل من R_2' ، R_1 على حدة .



شكل (١-١١)

ح - رسم مخطط الدائرة للمحرك باستخدام نتائج الاختبارين :

يبين شكل (١١ - ١) كيف نستفيد بالنتائج السابقة لرسم مخطط الدائرة للمحرك على النحو التالي :

I_0 , ϕ_0 تحددان النقطة O' ، بالنسبة لنقطة الأصل المختارة O . I'_{2sc} , ϕ_{2sc} تحددان النقطة A .

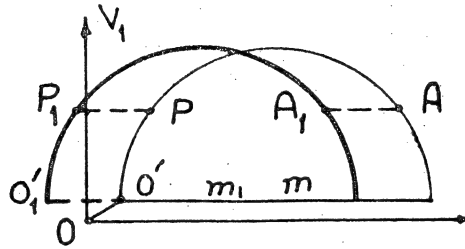
نصل $O'A$ ونقيم من منتصف عمودا الكى يقابل الخط الأفقى المرسوم من O' فى النقطة m مركز الدائرة ، فيكون $O'm$ هو نصف قطر الدائرة المطلوبة .

(٩ - ١) مخطط الدائرة عند استخدام مكثفات لتحسين معامل القدرة :

يكون معامل قدرة المحرك ثابتا . وقد يكون منخفضا فى بعض الاحيان لدرجة يتحتم فيها علينا (بايعاز من الهيئة التى تمدنا بالقدرة الكهربائية) استخدام مكثفات توصل على التوازي مع المحرك فتعمل على تحسين قيمة معامل قدرة التيار الكلى المأخوذ من الينبوع (هندسة الآلات الكهربائية مثال (٣) ص ٢٠٨) . ولا يتأثر التيار الذى يأخذه المحرك من الينبوع ، بطبيعة الحال ، بوجود مثل هذه المكثفات ، ونحصل عليه من مخطط الدائرة للمحرك ، على نفس المنوال السابق بالضبط .

أما بالنسبة للتيار الكلى ، وهو ما يهمننا من ناحية القيمة ومعامل القدرة بالنسبة لاشتراطات الهيئة التى تبيع لنا التيار ، فانتنا نستطيع أن نرسم له هو مخطط دائرة على نمط مخطط الدائرة للمحرك ، بحيث تتناظر على الدائرتين دائما نقطتان ($O, O_1 - O', O_1' - P, P_1 - A, A_1$) ، تعطيان تيار المحرك ، والتيار الكلى فى الينبوع . ويتم رسم الدائرة الجديدة من مخطط الدائرة الأصلية

للمحرك ، بنقلها كما هي بزيها افقيا إلى اليسار بالقيمة المناظرة للتيار المرحلى للمكثف ، كما هو مبين في شكل (١٢ - ١) .



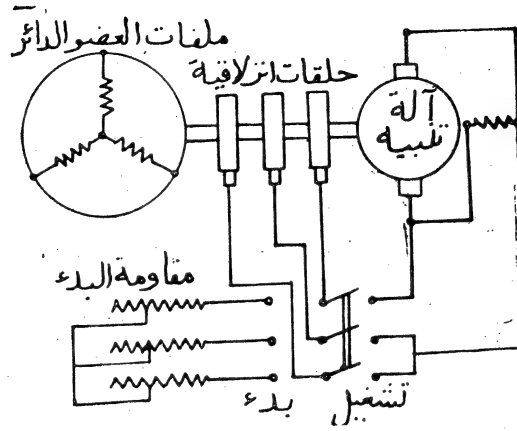
(شكل ١٢ - ١)

(١٠ - ١) المحرك المتزامن التأثري (The synchronous induction motor)

سبق أن ذكرنا أن سرعة المحرك التأثري n لا يمكن أن تصل في قيمتها إلى سرعة التزامن n_s ، نظرا لأن التيار التأثري الذي يتوقف عليه عزم دوران المحرك يتعذر في هذه الحالة ، عندما تساوى سرعة المجال المغناطيسى الدائر بالنسبة لملفات العضو الدائر صفرا ($s=0$) .

فإذا أردنا أن نصل بسرعة المحرك إلى قيمة سرعة التزامن ، وهو ما يشبه اجراء عملية تزامن له ، يجب علينا أن نزود ملفات العضو الدائر بتيار التنبيه اللازم لانشاء عزم الدوران المطلوب لاستمرار دوران المحرك عند سرعة التزامن . ويسمى مثل هذا المحرك ، الذى يعمل كمحرك تأثري في البداية (فترة البدء) ، ثم يتحول إلى محرك متزامن بعد ذلك بتوصيل تيار تنبيه مستمر إلى ملفات العضو الدائر ، باسم المحرك المتزامن التأثري . ويمكن اعتباره محركا متزامنا يستعان على بدئه بتشغيله كمحرك تأثري ، في خلال فترة البدء .

يبين شكل (١٣ - ١) كيفية اعداد المحرك لكي يعمل على هذا المنوال ،



شكل (١٣ - ١)

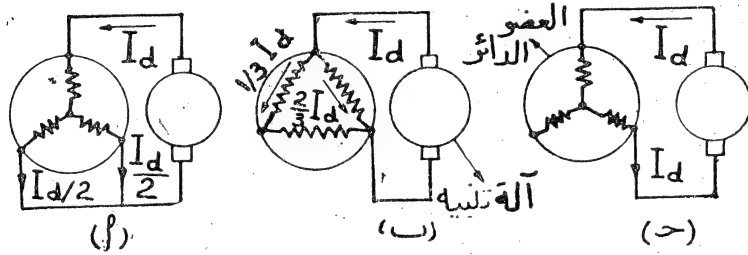
حيث يمكن توصيل ملفات العضو الدائر ، في خلال فترة البدء ، إلى مقاومات البدء ناحية اليسار المشار إليها بكلمة بدء ، حتى إذا ما وصل المحرك إلى سرعته المعتادة ، وهي قريبة جدا من سرعة التزامن ، يحول المفتاح على ناحية التشغيل إلى اليمين ، لكي يأخذ تيار التنبيه اللازم لادارته كمحرك متزامن من آلة التنبيه المعدة لهذا الغرض .

ومن الطبيعي أن يمر المحرك بفترة تلاشي ، ينتقل فيها من حالة التشغيل كمحرك تأثيري ، إلى حالة التشغيل كمحرك تزامن ، تكون هي حالة الدوام .

ويمكن تلخيص ما يحدث في خلال فترة التلاشي كما يأتي : ينشئ التيار المستمر عند مروره في ملفات العضو الدائر مجالا مغناطيسيا يكافئ المجال المغناطيسي الذي ينشئته التيار التأثيري المار في ملفات العضو الدائر ، وهو الذي يعطى عزم الدوران اللازم لادارة المحرك التأثيري . يترابط هذا المجال المغناطيسي الجديد بالمجال المغناطيسي الدائر للملفات العضو الثابت ، تماما كما

يحدث في حالة المحرك المتزامن عندما يدار حتى يصل إلى قرب سرعة التزامن ، ثم يمر تيار التنبيه في ملفات المجال لكي يحدث الترابط بين أقطاب المجال المغناطيسى الدائر والأقطاب الرئيسية على العضو الدائر ، فتتم عملية التزامن ، كما سبق شرحه (ص ٢٤٤ إلى ص ٢٤٦ من كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية) .

يلزم ، على هذا الأساس ، إيجاد العلاقة بين قيمة التيار التائيرى الفعالة I و تيار التنبيه المستمر I_d المكافئ له . ويتوقف شكل هذه العلاقة ، بطبيعة الحال ، على كيفية توصيل آلة التنبيه إلى ملفات العضو الدائر ، وكذلك نوع توصيل هذه الملفات ، كنجمة أو دلتا .



شكل (١٤-١)

يبين شكل (١٤-١) أنواع التوصيلات المألوفة في هذا المضمار . ويتضح أنه في شكل أ تكون قيمة التيار I_d في ملفات المرحلة الأولى ضعف قيمتيه المتساويتين $I_d/2$ في ملفات المرحلتين الآخرين ، وهى الحالة المماثلة لتوزيع التيار الخطي في الملفات ثلاثية المراحل عندما يكون التيار في ملفات المرحلة الأولى في قيمة النهاية العظمى له $I_m = \sqrt{2} I$. هذا يعنى أن $I_d = \sqrt{2} I$ ، أو أن $I = 0.707 I_d$ ، في هذه الحالة .

تجد في شكل ب أن قيمة التيار I_d في ملفات المرحلة الأولى ضعف

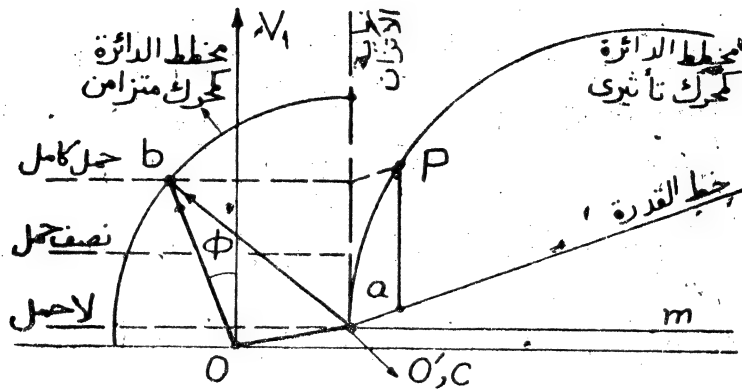
قيمتيه المتساويتين $I_d \frac{1}{3}$ في ملفات المرحلتين الآخرين ، وهى حالة مماثلة للحالة السابقة تماما ، باعتبار أن التيار $I_d \frac{2}{3}$ حل محل التيار I_d . وهذا يعنى أن $I = \sqrt{2} I_d \frac{2}{3}$ ، أو أن $I = 0.47 I_d$ ، فى هذه الحالة .

أما فى شكل ح فإن قيمة التيار تكون واحدة وهى I_d فى كل من ملفات المرحلتين الأولى والثانية ، بينما تكون قيمة التيار صفرا فى المرحلة الثالثة . وهى الحالة المماثلة لتوزيع التيار اللحظى فى الملفات ثلاثية المراحل عندما تكون قيمة التيار اللحظية فى كل من ملفات المرحلة الأولى والثانية $I = \frac{\sqrt{3}}{2} I_m$

وقيمة التيار الخطية فى المرحلة الثالثة تساوى صفرا . هذا يعنى أن $I_d = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} I$ ، أو أن $I = 0.82 I_d$ ، فى هذه الحالة .

عندما يعمل المحرك متزامنا يكون المحل الهندسى لطرف التيار المرحلي فى ملفات المنتج عبارة عن دائرة ، وذلك إذا ظل تيار التذبذب ثابتا عند قيمة معينة ، كما سبق شرحه بالتفصيل بالإشارة إلى شكل (١٦ - ٤) ص ١٣٢ من كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربائية . وفى هذه الحالة يمثل المستقيم oc التيار V_1 / Z_s ، الذى يصنع مع متجه الضغط V_1 الزاوية $\theta = \tan^{-1} \frac{X_s}{R}$. ومن الواضح أنه بالنسبة للمحرك التى كان تأثيريا واصبح متزامنا تكون معاوقة التزامن هى نفسها معاوقة التمعطس المبينة فى الدائرة المكافئة للمحرك بالحدين X_o ، R_o ، فى شكل (٧ - ١) ، وهذا يعنى أن V_1 / Z_s للمحرك المتزامن هى نفسها I_o للمحرك التأثيرى ، بحيث يشترك مخطط الدائرة للمحرك وهو تأثيرى مع المتجهات للمحرك وهو متزامن ، كما هو مبين فى شكل (١٥ - ١) ، معا فى الخط oc الذى يمثل V_1 / Z_s للحالة الأولى ، والخط oo' ، الذى يمثل I_o للحالة الثانية . بذلك تنطبق النقطة O' فى مخطط دائرة المحرك

التأثيرى ، على النقطة c ، فى مخطط متجهات المحرك المتزامن ، كما هو مبين فى شكل (١٥ - ١) .



شكل (١٥ - ١)

فاذا رسمنا مخطط الدائرة للمحرك وهو تأثيرى بالطريقة التقليدية ، وكانت النقطة P شكل (١٥ - ١) على محيط الدائرة تمثل نقطة التشغيل ، وكان Pa يمثل قدرة المخرج عند الحمل الكامل ، فان OP يمثل التيار المرحلى فى ملفات العضو الثابت عند الحمل الكامل ايضا ، كما سبق باشرحة بالتفصيل بالنسبة لمخطط دائرة المحرك التأثيرى .

بالنسبة لمخطط متجهات المحرك وهو متزامن ، فان مستويات القدرة الميكانيكية تكون عبارة عن دوار يقع مركزها على الخط الرأسى المقام من O ، ويبعد عنها بالمسافة الرأسية التى تمثل التيار $V/2R$. فاذا كانت R صغيرة جداً ، بحيث يمكن ان نساوئها بالصفر ، فان مركز الدوار يقع فى ما لا نهاية ، وتؤول هذه الدوار إلى خطوط مستقيمة ، هى مستويات قدرة المخرج المختلفة ، كما سبق شرحه بالنسبة للمحرك المتزامن . بذلك يمكن رسم خط مستوى قدرة المخرج للحمل الكامل ، فى حالة المحرك المتزامن ،

باستغلال وضع النقطة P ، والمسافة Pa ، التي تمثل قدرة المخرج عند الحمل الكامل ، للمحرك التأثيرى ، كما هو مبين فى شكل (١٥ - ١) . لكن نستطيع تحديد نقطة الحمل الكامل b ، ثم نعين التيار المرحلى فى ملفات المنتج للمحرك ، وهو متزامن ، يجب أن نرسم دائرة التنبيه الثابت للمحرك ، التى تناظر التنبيه الثابت E_o/Z_s ، التى تتقاطع مع الخط ، الذى يمثل مستوى قدرة الحمل الكامل فى النقطة المطلوبة . يكون تيار التنبيه المطلوب E_o/Z_s ، للمحرك المتزامن ، هو فى الواقع التيار التأثيرى I ، المكافىء لتيار التنبيه المستمر I_d ، كما سبق حسابه من قبل ، ويمثله cb نصف قطر مخطط دائرة المحرك المتزامن . بذلك يمكن تحديد نقطة التشغيل b ، كمحرك متزامن ، عند الحمل الكامل ، بمعلومية قدرة المخرج ، و تيار التنبيه I_d ، وذلك بالنسبة لمخطط دائرة المحرك التأثيرى ، ثم الحصول على التيار المرحلى ، فى منتج المحرك المتزامن ، الذى يمثله النتيجة ob ، فى هذه الحالة .

أمثلة محلولة :

(1) The power input to the rotor of a 440 V 50 HZ, 6 pole, 3 - phase induction motor is 80 KW. The rotor electromotive force is observed to make 100 complete alternations per minute. Calculate ; (a) the slip , (b) the rotor speed, (c) the total mechanical power developed (d) the rotor copper losses per phase : (e) the rotor resistance per phase if the rotor current is 65 A .

$$P_{12} = P_g = 80000 \text{ W}$$

$$(a) S = \frac{100}{60 \times 50} = 0.033 = 3.3 \%$$

$$(b) n = n_s (1 - s) = 1000 (1 - 0.033) = 967 \text{ r.p.m.}$$

$$(c) \quad P_m = P_{12} (1 - s) = 80000 \times 0.967 = 77360 \text{ W} \\ = 103.6 \text{ HP}$$

$$(d) \quad P_{cu2} = 3 I_2^2 R_2 = s P_{12} = 0.033 \times 80000 = 2640 \text{ W}$$

$$\text{rotor copper losses per phas} = I_2^2 R_2 = \frac{2640}{3} = 880 \text{ W}$$

$$(e) \quad R_2 = \frac{880}{I_2^2} = \frac{880}{4220} = 0.208 \text{ ohm}$$

(2) A 3000 V, 16 pole, 50 Hz, 3 phase, delta connected induction motor has a slip ring rotor which has a resistance of 0.02 ohm and a stand still reactance of 0.3 ohm per phase. The ratio of stator to rotor turns is 3. The full load torque is obtained at 362 r.p.m., calculate :

(a) the full load torque ; (b) the maximum torque and the speed at which it occurs ; (c) the full load rotor copper losses ; (d) the resistance which must be added to each rotor phase to give maximum torque at starting.

$$X'_{20} = 0.3 \times 9 = 2.7 \text{ ohms}, \quad n_s = \frac{60 f}{p} = \frac{3000}{8} \\ n_s = 375 \text{ r. p. m.}$$

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{375 - 362}{375} = 0.0347 = 3.47\%$$

$$K_t = \frac{3p E_1^2}{2\pi f X'_{20} \times 9.81} = \frac{9 \times 10^6 \times 8}{314 \times 2.7 \times 9.81} \\ = 8660 \text{ Kg. m.}$$

يلاحظ أننا استخدمنا الضغط المرحلي $V_1 = 3000$ (يساوي الضغط الخطي لأن التوصيل دلتا) بدلا من E_1 باعتبارهما متساويان تقريبا، فنكون قد أهملنا هبوط الضغط في الملفات الابتدائية.

$$\alpha = S = \frac{R_2}{X_{20}} = \frac{0.02}{0.3} = 0.067$$

$$(a) T_{fl} = K_t \times \frac{S\alpha}{S^2 + \alpha^2} = 8660 \frac{2.31 \times 10^{-3}}{12 \times 10^{-4} + 44.5 \times 10^{-4}} \\ = 3550 \text{ Kg. m.}$$

$$(b) T_{max} = \frac{1}{2} K_t = 4330 \text{ Kg. m.}$$

$$n_{max} = n_s (1 - S_m) = 375 \times 0.933 = 352 \text{ r. p. m.}$$

$$(c) P_g = T\omega_s = 3550 \times \frac{2\pi n_s}{60} \times \frac{9.81}{1000} = 1370 \text{ KW}$$

$$P_{cu2} = s P_g = 1370 \times 0.0347 = 47.5 \text{ KW}$$

$$(d) R_{st} = X_{20} - R_2 = 0.3 - 0.02 = 0.28 \text{ ohm}$$

(3) a 3 phase induction motor has a 4 - pole, star connected stator winding and runs on a 220 V, 50 Hz supply, at 0.866 power factor. The rotor has resistance and reactance per phase 0.1 ohm and 0.9 ohm respectively. The ratio of stator to rotor turns is 1.75. Find, for a slip of 5%, the total torque developed, the rotor copper losses, and the mechanical power. Find also the maximum torque and the speed at which it occurs. If the mechanical losses are 700 watts, and the stator losses 500 watts, find the efficiency and line current. Neglect stator impedance drop

$$X_{20} = 0.9 \times (1.75)^2 = 2.754 \text{ ohms, } n_s = \frac{3000}{2}$$

$$n_s = 1500 \text{ r. p. m.}$$

$$K_t = \frac{3 \times 2 \times (127)^2}{2\pi \times 50 \times 2.754 \times 9.81} = 11.4 \text{ Kg. m.}$$

$$T_{\max} = \frac{K_t}{2} = 5.7 \text{ Kg.m.}, \quad S_m = \infty = \frac{0.1}{0.9} = 0.111$$

$$n_{\max} = 1500 (1 - 0.11) = 1330 \text{ r.p.m.}$$

$$T = K_t \frac{S \infty}{S^2 + \infty^2} = 11.4 \frac{0.11 \times 0.05}{0.0121 + 0.0025} = 4.29 \text{ Kg.m.}$$

$$n = n_s (1 - S) = 1500 (1 - 0.05) = 1425 \text{ r.p.m.}$$

$$P_m = T\omega = 4.29 \times \frac{2\pi \times 1425}{60} \times 9.81 = 6280 \text{ W}$$

$$= 8.41 \text{ HP}$$

$$P_g = \frac{P_m}{1 - S} = \frac{6280}{0.95} = 6610 \text{ W}$$

$$P_{cu2} = SP_g = 6610 \times 0.05 = 330.5 \text{ W}$$

$$P_1 = P_g + P_{st} = 6610 + 500 = 7110 \text{ W}$$

$$P_2 = P_m - P_f = 6280 - 700 = 5580 \text{ W}$$

$$\text{Efficiency} = \frac{5580}{7100} = 78.6 \%$$

$$I_L = \frac{7100}{\sqrt{3} \times 220 \times 0.866} = 21.5 \text{ amps.}$$

(4) A 3 phase, 12 pole, star connected induction motor has a final output of 450 H.P when connected to 2000 V, 50 c/s supply and runs with a slip of 3%. the stator losses are 6.7 KW and the mechanical losses are 7.5 KW. If the power factor is 0.85, find the line current, the full load torque and the speed of the motor.

If the equivalent rotor reactance per phase, referred to the

stator is 2 ohms, find the value of the maximum torque and the approximate value of the speed at which it occurs. Neglect voltage drop on the stator side.

$$P_m = 450 \times 0.746 + 7.5 = 343.5 \text{ KW}$$

$$n_s = \frac{3000}{6} = 500 \text{ r.p.m.}$$

$$P_g = \frac{343.5}{0.97} = 354 \text{ KW} \quad , \quad (1 - S = 0.97)$$

$$P_1 = 354 + 6.7 = 360.7$$

$$I_l = \frac{360.7 \times 1000}{\sqrt{3} \times 2000 \times 0.85} = 122.6 \text{ Amps.}$$

$$T = \frac{P_m}{\omega} = \frac{P_g}{\omega_s} = \frac{354 \times 1000 \times 60}{2\pi \times 500 \times 9.81} = 688 \text{ Kg.m}$$

$$n = n_s (1 - S) = 500 \times 0.97 = 485 \text{ r.p.m.}$$

$$T_{\max} = \frac{1}{2} K_t = \frac{6 \times 4 \times 10^6}{2\pi \times 50 \times 2 \times 9.81} = 1930 \text{ Kg.m.}$$

$$\frac{T}{T_{\max}} = \frac{688}{1930} = \frac{0.03 \infty}{0.0009 + \infty^2} = \frac{0.03}{\infty} (\infty^2 \gg S^2)$$

$$\therefore \infty = 0.084 \quad , \quad S_m = 0.084$$

$$n_m = n_s (1 - S_m) = 500 \times 0.916 = 458 \text{ r.p.m.}$$

(5) A 3 phase, 8 pole, delta connected induction motor has an input of 15 KW at a power factor of 0.85 and runs at a speed of 720 r.p.m. when it is connected to a 220 V; 50 c/s supply

The mechanical losses are 1.2 H.P. and the efficiency is 0.84. Find the phase and line currents, the slip, the rotor copper losses and the stator losses.

If the ratio of maximum to full load torque is 2.5, find the value of the maximum torque and the speed at which it occurs.

Find also the values of the rotor resistance and standstill reactance per phase, referred to stator side.

Neglect the voltage drop in the stator.

$$I_L = \frac{15 \times 1000}{\sqrt{3} \times 220 \times 0.85} = 46.25 \text{ A}, I_{ph} = \frac{46.25}{\sqrt{3}} = 26.7 \text{ A}$$

$$P_2 = 15 \times 0.84 = 12.6 \text{ KW} = 16.89 \text{ HP}$$

$$P_m = 16.89 + 1.2 = 18.09 \text{ HP} = 13.52 \text{ KW}$$

$$n_s = \frac{3000}{4} = 750 \text{ r.p.m.}, S = \frac{750 - 720}{750} = 0.04$$

$$P_g = \frac{P_m}{1 - S} = \frac{13.52}{0.96} = 14.08 \text{ KW}$$

$$P_{cu2} = S P_g = 14.08 \times 0.04 = 0.5632 \text{ KW}$$

$$\text{Stator losses} = P_1 - P_g = 15 - 14.08 = 0.92 \text{ KW}$$

$$T_{fl} = \frac{P_g}{\omega_s} \frac{14080 \times 60}{2\pi \times 720 \times 9.81} = 18.25 \text{ Kg.m.}$$

$$T_m = 18.25 \times 2.5 = 45.7 \text{ Kg.m.}$$

$$\frac{T_{fl}}{T_m} = \frac{2s \infty}{S^2 + \infty^2}, \quad 0.2 = \frac{0.04 \infty}{0.0016 + \infty^2}$$

$$\therefore 0.032 + 20 \infty^2 - 4 \infty = 0$$

6V

$$\infty = \frac{4 \pm \sqrt{16 - 2.56}}{40} = 0.1915$$

$$n_m = 750 (1 - 0.1915) = 606 \text{ r.p.m.}$$

$$T_m = \frac{1}{2} K_t = \frac{1}{2} \frac{3 p E_1^2}{2\pi f X'_{20} \times 9.81}$$

$$45.7 = \frac{1}{2} \frac{12 \times 16150}{314 X'_{20} \times 9.81}, \quad X'_{20} = 0.686 \text{ ohm}$$

$$R'_2 = \infty X'_{20} = 0.1915 \times 0.686 = 0.132 \text{ ohm}$$

(6) A 3 phase, 6 pole, star connected induction motor has an output of 7.5 H.P., when supplied from 220 V, 50 c/s supply. When tested on no load at rated voltage, the motor takes 270 W and a current of 10 A from the supply. With the rotor blocked, the motor takes a current of 21 A and a power of 800 W, when connected to a 55 V supply. Draw the circle diagram and determine from it the full load line current and power factor. Find also the starting torque assuming equal stator and referred rotor resistance.

$$I_0 = 10 \text{ A}, \quad \cos \phi_0 = \frac{270}{\sqrt{3} \times 10 \times 220} = 0.0707$$

$$I_{sc} = 21 \times \frac{220}{55} = 84 \text{ A}$$

$$\cos \phi_{sc} = \frac{800}{\sqrt{3} \times 55 \times 21} = 0.4$$

Scales: 1 cm = 5 amps

٥٩
 نحصل من الرسم بعد تحديد نقطة التشغيل عند الحمل الكامل (e) على
 أساس القدرة 7.5 حصان على المعلومات الآتية :

$$I_{f1} = 4.35 \times 5 = 21.75 \text{ Amps}$$

(لاحظ أن الرسم المعطى في الشكل مصغر بنسبة ١ : ٢)

$$\cos \phi_{f1} = 0.8$$

$$T_{st} = 3.25 \times 1.855 = 6.025 \text{ Kg.m.}$$

(7) A 3-phase induction motor has a 10 pole, star connected, stator winding, which is connected to a 2000 V, 50 Hz supply. The rotor resistance is 0.023 ohm, and standstill reactance 0.16 ohm per phase. The ratio of stator to rotor turns is 5.5 and the full load torque developed is 181 Kg. m. If the stator has a reactance of 4 ohms and a resistance of 0.7 ohm per phase, and the motor takes a current of 15 amps. at 0.07 power factor on no load, draw the circle diagram and determine from it the full load current and power factor. Determine also the starting torque, the ratio maximum to full load torque and the speed at which maximum torque occurs.

$$V_{ph} = \frac{2000}{\sqrt{3}} = 1150 \text{ V}, \quad \cos \phi = \frac{R_2}{X_{20}} = \frac{0.023}{0.16} = 0.144$$

$$n_s = \frac{3000}{5} = 600 \text{ r.p.m.}, \quad n = 600 \times 0.98 = 588 \text{ r.p.m.}$$

$$n_m = 600 \times 0.856 = 514 \text{ r.p.m.}$$

$$X'_{20} = 0.16 \times (5.5)^2 = 4.85 \text{ ohms}$$

$$P_m = T_{fl} \omega = 181 \times \frac{9.81}{1000} \times 2\pi \times \frac{588}{60} = 110 \text{ KW}$$

$$\frac{T_m}{T_{fl}} = 1.8$$

$$R'_2 = 0.025 \times (5.5)^2 = 0.697 \text{ ohm}$$

$$X_{leq} = X_1 + X'_{20} = 4 + 4.85 = 8.85 \text{ ohms}$$

$$I_d \text{ (قطر الدائرة)} = \frac{1150}{8.85} = 130 \text{ amps.}$$

$$\tan \phi_{sc} = \frac{X_1 + X'_{20}}{R_1 + R'_2} = \frac{8.85}{1.397} = 6.43, \phi_{sc} = 81^\circ$$

scales : 1 cm = 10 amps

$$1 \text{ cm} = 10 \sqrt{3} \times \frac{2000}{1000} = 34.6 \text{ KW}$$

$$1 \text{ cm} = \frac{34600}{2\pi \times \frac{600}{60} \times 9.81} = 56.2 \text{ Kg.m}$$

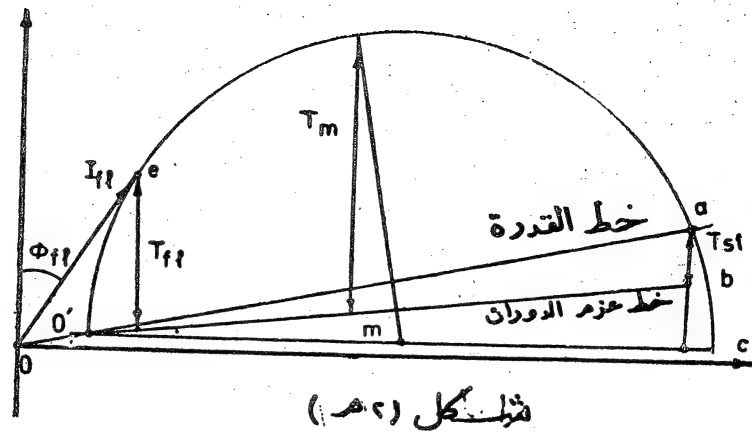
$$T_{fl} \text{ is represented by } \frac{181}{56.2} = 3.23 \text{ cms}$$

$$I_d \text{ is represented by } \frac{130}{10} = 13 \text{ cms}$$

$$\phi_0 = \cos^{-1} 0.07 = 86^\circ$$

$$\frac{ab}{bc} = \frac{R'_2}{R_1} = \frac{0.697}{0.7} = 1 \text{ لتحديد خط عزم الدوران}$$

من المعلومات السابقة يمكننا رسم مخطط الدائرة كما هو مبين في شكل (م٢)



وتحديد نقطة التشغيل عند الحمل الكامل (e)، ومن هذا المخطط تحصل على المعلومات الآتية :

$$I_{f1} = 43.5 \text{ amps} , \quad \cos \phi_{f1} = 0.8$$

$$T_{sl} = 1.2 \times 56.2 = 67.5 \text{ Kg.m.}$$

(تجب مراعاة أن شكل (٢٠ م) مصغر بنسبة ٢ : ٣)

(8) The following figures were obtained from tests on a 1600 HP, 3 - phase, 50 HZ , 3000 V , 24 pole induction motort

No load test : 3000 V , 100 amps , 30 KW

Short circuit test (locked rotor test)

1000 V, 445 amps, 170 KW

The resistance per phase of the star connected rotor and stator are 0.14 ohm and 0.24 ohm respectively. Ratio of transformation stator to rotor is 2.4. Draw the circle diagram

74

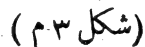
$$\cos \phi_0 = \frac{30000}{\sqrt{3} \times 3000 \times 100} = 0.0577, \quad \phi_0 = 86^\circ 42'$$

$$\cos \phi_{sc} = \frac{170000}{\sqrt{3} \times 1000 \times 445} = 0.2207, \quad \phi_{sc} = 77^\circ 12'$$

$$R'_2 = 0.024 \times 56.776 = 0.138, \frac{R_1}{R'_2} = \frac{0.14}{0.138} \approx 1 \approx \frac{ab}{bc}$$

$$1 \text{ cm} = \sqrt{3} \times 3000 \times \frac{100}{1000} = 519.6 \text{ KW}$$

$P_2 = 1600 \text{ HP} = 1192.5 \text{ KW}$ represented by 2.3 cms



باستخدام المعلومات السابقة يمكننا رسم مخطط التجهيزات ، كما هو في شكل ٣ م الذي نحصل منه على ما هو مطلوب ، كما يأتي:

$$I_{f1} = 290 \text{ amps} , \cos \phi_{f1} = 0.866$$

$$T_{f1} = 2.35 \times 2020 = 4750 \text{ Kg.m.}$$

$$T_{st} = 1.45 \times 2020 = 2920 \text{ Kg.m.}$$

$$P_m = 5 \times 519.6 = 2598 \text{ KW}$$

$$T_m = 5.63 \times 2020 = 11400 \text{ Kg.m.}$$

$$P_1 = \sqrt{3} \times \frac{3000}{1000} \times 290 \times 0.866 = 1307 \text{ KW}$$

$$\text{efficiency} = \frac{1192.5 \times 100}{1307} = 91.3 \%$$

(يلاحظ أن الرسم مصغر بنسبة ٢ : ٣)

(9) A 3-phase induction motor has a 4-pole, star connected stator winding, and runs on a 220 V, 50 HZ supply. The rotor resistance and reactance per phase are 0.1 ohm and 0.9 ohm respectively. The ratio of stator to rotor turns is 1.75. The full load slip is 0.05 and the mechanical losses are 0.5 HP. Calculate : (a) the maximum torque and the speed at which it occurs, (b) the full load torque, (c) the full load output in brake HP, (d) the approximate value of the stator voltage which would give full load at one half of full load speed.

$$(a) |X'_{20} = (0.9) \times (1.75)^2 = 2.76 \text{ ohms} , n_s = \frac{3000}{2}$$

$$= 1500 \text{ r.p.m.}$$

$$T_m = \frac{1}{2} K_t = \frac{1}{2} \times \frac{3 \times 2 \times \left(\frac{220}{\sqrt{3}}\right)^2}{2 \pi 50 \times 2.76 \times 9.81} = 5.7 \text{ Kg.m.}$$

$$K_t = 2 T_m = 11.4 \text{ Kg.m.}, \quad \infty = S_m = \frac{R_2}{X_{20}} = 0.111$$

$$n_m = 1500 (1 - 0.111) = 1333 \text{ r.p.m.}$$

$$(b) T_{fl} = K_t \frac{S \infty}{S^2 + \infty^2} = 11.4 \frac{0.05 \times 0.111}{(0.05)^2 + (0.111)^2} = 4.29 \text{ Kg.m.}$$

$$(c) \text{ Full load power } P_m = P_g (1 - S) = \frac{P_{cu2}}{S} (1 - S)$$

$$P_m = \frac{3 I_{2s}'^2 r_2'}{S} (1 - S) \times \frac{1}{746} = \frac{3 r_2'}{S} ((1 - S) \times \frac{1}{746} \times \frac{S^2 E^2}{r_2'^2 + S^2 X_{20}'^2})$$

$$= \frac{3 \times (1.75)^2 \times 0.1 \times 0.95}{746 \times 0.05}$$

$$\times \frac{(0.05)^2 \times \left(\frac{220}{\sqrt{3}}\right)^2}{(1.75)^4 [(0.1)^2 + (0.05)^2 (0.9)^2]} = 8.36$$

$$n = n_s (1 - S) = 1500 \times 0.95 = 1425 \text{ r.p.m.}$$

$$P_2 \text{ Brake horsepower } P_m - 0.5 = 8.36 - 0.5 \\ = 7.86 \text{ HP}$$

$$(d) n_{fl} = 1425 \text{ r.p.m.}, \quad \frac{1}{2} n_{fl} = 712.5 \text{ r.p.m.}$$

$$712.5 = 1500 (1 - S_1), \quad S_1 = 0.525$$

$$P_{m1} = P_m = 3 r_2' \frac{(1 - S_1)}{S_1} \times \frac{S_1^2 E_1^2}{r_2'^2 + S_1^2 X_{20}^2}$$

$$8.36 \times 746 = \frac{3 \times 0.1 \times (1.75)^2 \times 0.475 \times 0.525 \times E_1^2}{(1.75)^4 [(0.1)^2 + (0.525)^2 (0.9)^2]}$$

$$8.36 \times 746 \times (1.75)^2 [0.01 + 0.223] = 0.1425 \times 0.525 E_1^2$$

$$\therefore E_1^2 = \frac{8.36 \times 746 \times 3.06 \times 0.233}{0.145 \times 0.525} = 5.84 \times 10^4$$

$$E_1 = 242 \text{ V}$$

وهذه هي قيمة الضغط المرحلي وهي ضعف الضغط الاصلى تقريبا

$$E_{IL} = \sqrt{3} \times 242 = 418 \text{ V}$$

هذا ويمكن حل المسألة على النحو التالى:

$$P_m = T\omega, \quad P_{m1} = T_1 \omega_1, \quad P_m = P_{m1}$$

$$\therefore T\omega = T_1 \omega_1$$

$$T = K_t \frac{E^2 \propto S}{S^2 + \infty^2}, \quad T_1 = K_t \frac{E_1^2 \propto S_1}{S_1^2 + \infty_1^2}$$

$$\omega = \omega_s (1 - S), \quad \omega_1 = \omega_s (1 - S_1)$$

$$\therefore K_t \omega_s (1 - S) \frac{E^2 \propto S}{S^2 + \infty^2} = K_t \omega_s (1 - S_1) \frac{E_1^2 \propto_1 S_1}{S_1^2 + \infty_1^2}$$

$$\infty_1 = \infty$$

$$\begin{aligned} \therefore E_1^2 &= E^2 \frac{S(1-S)(S_1^2 + \infty^2)}{S_1(1-S_1)(S^2 + \infty^2)} \\ &= \left(\frac{220}{\sqrt{3}} \right)^2 \frac{0,05 \times 0,95 (0,275 + 0,0121)}{0,525 \times 0,475 (0,0025 + 0,0121)} \\ &= 6,03 \times 10^4 \end{aligned}$$

$$E_1 = 246 \text{ V}$$

اختلفت النتيجة عما سبق اختلافا طفيفا بسبب التقريبات المختلفة في القوانين المستنبطة.

(١١ - ١) الدائرة المكافئة المضبوطة للمحرك التآثيرى ثلاثى المراحل :

(The exact equivalent circuit of the 3 - phase Induction Motor)

نلاحظ أننا بينا نظريات المحرك التآثيرى ثلاثى المراحل كلها على أساس الدائرة المكافئة التقريبية المبينة في شكل (٧ - ١) ، ومن ثم تكون الحسابات المترتبة على هذه النظريات والتي تعطى خواص تشغيل المحرك كلها تقريبية . وتختلف درجة التقريب على حسب حجم المحرك ومقدار معامل الانزلاق s الذى تجرى عنده الحسابات ، بحيث يقل مقدار الخطأ الناشئ عن هذا التقريب كلما صغرت قيمة معامل الانزلاق . لذلك فان هذه الدائرة المكافئة التقريبية تعطى نتائج يمكن قبولها والاعتماد عليها عندما يكون معامل الانزلاق في حدود قيمته عند الحمل الكامل تقريبا ، أما إذا زاد على ذلك (وخصوصا بالنسبة للحسابات الخاصة بقيمة النهاية العظمى لعزم الدوران) ، فانه يستحسن استخدام الدائرة المكافئة الأصلية للمحرك ، كما سيرد تفصيله في هذه الجزء .

ويجب أن نلفت النظر هنا في هذا المجال إلى أن المعادلات من (١٧ - ١)

إلى (٢١ - ١) الخاصة بالقـدرة وعزم الدوران تعطى كلها علاقات صحيحة ينشأ التقريب فيها من ناحيتين : (أولا) عند اعتبار أن $V_1 \approx E_1$ ، وينتفى التقريب الناشئ عن ذلك لو أمكن الحصول على E_1 واستخدامها فعلا بدلا من V_1 (ثانيا) أن E_1 ذات قيمة ثابتة ، وهو ما يترتب على اعتبار أن الفيض المغناطيسي المتبادل ϕ_m ثابت قيمة عند كل الأحوال ، وهذا غير صحيح ، وإلا وجب أن تتغير قيمة ضغط اليزوع V_{ix} نتيجة لتغير الحمل وبالتالي نتيجة لتغير هبوط الضغط في كل من R_1 ، X_1 بسبب تغير قيمة I_1 الناشئ عن تغير الحمل .

للحصول على علاقات مضبوطة نستخدم الدائرة المكافئة الأصلية للمحرك المبينة في شكل (١٦ - ١) والمتطورة من شكل (١٢ - ٢) . فإذا رمزنا إلى السامح Y_0 (admittance) الناتج عن دائرة المغطسة ، وباعتبار أن $Z_1 = R_1 + jX_1$ ، نجد أن :

$$Z_{12s} = \left(\frac{R'_2}{s} + jX'_{20} \right)$$

$$Y_0 = \frac{1}{R_0} - j \frac{1}{X_0} , \quad I_0 = E_1 Y_0$$

$$I_{12} = I_{12s} = \frac{E_1}{Z_{12s}} , \quad I_1 = I_{12} + I_0$$

$$\therefore I_1 = E_1 \left(Y_0 + \frac{1}{Z_{12s}} \right) \quad (١ - ٣١)$$

$$V_1 = E_1 + I_1 Z_1 = E_1 + E_1 Z_1 \left(Y_0 + \frac{1}{Z_{12s}} \right) = E_1 \left(1 + Z_1 Y_0 + \frac{Z_1}{Z_{12s}} \right) \quad (١ - ٣٢)$$

$$Z_1 Y_0 = (R_1 + j X_1) \times \left(\frac{1}{R_0} - \frac{j}{X_0} \right)$$

$$Z_1 Y_0 = \frac{R_1 X_0 - j R_1 R_0 + j X_1 X_0 + X_1 R_0}{R_0 X_0}$$

$$= \left(\frac{R_1}{R_0} + \frac{X_1}{X_0} \right) - j \left(\frac{R_1}{X_0} - \frac{X_1}{R_0} \right) \quad (1-33)$$

نظرا لأن كلا من $\frac{R_1}{R_0}$ ، $\frac{X_1}{X_0}$ ، $\frac{R_1}{X_0}$ ، $\frac{X_1}{R_0}$ أعداد كسرية صغيرة

جدا وذلك بسبب كبر كلا من R_0 ، X_0 بالنسبة لكل من R_1 ، X_1 فاننا نستطيع ان نهمل الجزء التخيلى فى قيمة $Z_1 Y_0$ (حيث أنه يساوى الفرق بين كسرين صغيرين متقاربين فى القيمة) ونستطيع أن نعتبر هذه القيمة حقيقية مساوية لكسر صغير وهو عبارة عن $\left(\frac{R_1}{R_0} + \frac{X_1}{X_0} \right)$.

ويمكننا فى هذه الحالة أن نعتبر أن $(1 + Z_1 Y_0)$ عدد حقيقى ثابت اكبر قليلا من الواحد الصحيح ولنرمز له بالرمز k .

$$V_1 \stackrel{\circ}{=} E_1 \left(k + \frac{Z_1}{Z'_{2s}} \right) \quad (1-34)$$

$$\therefore E_1 \stackrel{\circ}{=} \frac{V_1}{k + \frac{Z_1}{Z'_{2s}}} = V_1 \frac{Z'_{2s}}{Z_1 + k Z'_{2s}}$$

$$E_1 \stackrel{\circ}{=} V_1 \frac{\frac{R'_2}{s} + j X'_{20}}{(R_1 + j X_1) + k \left(\frac{R'_2}{s} + j X'_{20} \right)} \quad (1-35)$$

وتكون القيمة العددية لـ E_1 عبارة عن

$$E_1 = \sqrt{\frac{(\frac{R'_2}{s})^2 + (X'_{20})^2}{[R_1 + k(\frac{R'_2}{s})]^2 + (X_1 + kX'_{20})^2}} \times V_1 \quad (٣٦-١)$$

بالتعويض عن k بالقيمة المقربة $(1 + \frac{R_1}{R_0} + \frac{X_1}{X_0})$ يمكننا الحصول على قيمة E_1 من المعادلة السابقة أقرب ما تكون إلى القيمة المضبوطة، ويمكن استخدام هذه القيمة في معادلات عزم الدوران والقدرة للحصول على نتائج أكثر دقة من تلك التي حصلنا عليها باعتبار أن $E_1 = V_1$. هذا وعندما تصل سرعة العضو الدائر إلى سرعة التزامن (بمساعده عزم دوران في نفس اتجاه دورانه) تصبح $s = 0$ وتصبح قيمة Z'_{2s} تساوي ما لا نهاية ($\frac{R'_2}{s} = \infty$) بحيث تصبح قيمة $\frac{Z_1}{Z'_{2s}}$ في المعادلة (٣٤-١) مساوية للصفر وتصبح $k = \frac{V_1}{E_1}$ ، وهذا يعني أن قيمة k تساوي النسبة بين E_1 ، V_1 عندما يدار المحرك بسرعة التزامن.

ومن ناحية أخرى، فإنه يمكن استخدام العلاقات السابقة للحصول على القدرة وعزم الدوران باستخدام V_1 بدلا من E_1 على النحو التالي:

$$I'_{2s} = \frac{E_1}{Z'_{2s}} = \frac{V_1}{Z_1 + k Z'_{2s}} = \frac{V_1}{(R_1 + jX_1) + k \left[\frac{R'_2}{s} + j X'_{20} \right]}$$

وتكون القيمة العددية لـ I'_{2s} هي:

$$I'_2 = \frac{V_1}{\sqrt{\left[R_1 + k \left(\frac{R'_2}{S}\right)\right]^2 + (X_1 + k X'_{20})^2}} \quad (١٤٣٧)$$

$$= \frac{V_1}{\sqrt{\left[R_1 + \frac{R'_2}{S}\right]^2 + (X_1 + X'_{20})^2}} \quad (١٤٣٨)$$

وهذه القيمة التقريبية التي تعطىها المعادلة (١٤٣٨) لـ I'_{2s} هي نفس القيمة التي حصلنا عليها سابقا باستخدام الدائرة المكافئة التقريبية شكل (١-١) التي اعتبرت فيها R_0 و X_0 موصلتين على اليزبوع مباشرة . والمعادلة (١-٣٧) هي الأخرى تقريبية باعتبار $k = \left(1 + \frac{X_1}{X_0} + \frac{R_1}{R_0}\right)$ ويقل مقدار التقريب فيها كلما اقتربت قيمة S من الصفر.

يمكننا الآن الحصول على عزم الدوران والقدرة بأشكالها المختلفة ، كما سبق أن حصلنا عليها في البداية في المعادلات من (٨ - ١) إلى (١٧ - ١) ، ولكن بدلالة V_1 ضغط اليزبوع هذه المرة ، وهو ثابت القيمة فعلا ، بدلا من E_1 التي اعتبرناها ثابتة القيمة في المعادلات المذكورة .

$$T = \frac{P_g}{9.81 \times 2\pi \frac{n_s}{60}} = 0.975 \frac{3 I_{2s}'^2}{n_s} \times \frac{R'_2}{S}$$

وبالتعويض عن I'_{2s} بما يساويه بدلالة V_1 من المعادلة (٣٧ - ١) نجد أن

$$T = \frac{2.925 V_1^2}{n_s} \frac{\left(\frac{R'_2}{S}\right)}{\left[R_1 + k\left(\frac{R'_2}{S}\right)\right]^2 + \left[X_1 + k X'_{20}\right]^2}$$

(١-٣٩)

$$P_g = 3 I_{2s}^2 \frac{R'_2}{S} = 3 I_{2s}^2 \frac{R_2}{S}$$

$$= 3 V_1^2 \frac{\left(\frac{R'_2}{S}\right)}{\left[R_1 + k\left(\frac{R'_2}{S}\right)\right]^2 + \left[X_1 + k X'_{20}\right]^2} (1-40)$$

$$P_m = (1-S) P_g, \quad P_{cu_2} = S P_g \quad (1-41)$$

يكون منحنى عزم الدوران مع الانزلاق ، مشابهاً لمثيله عند اعتبار E_1 ثابتة القيمة ، ويمكن رسمه باستخدام المعادلة (٣٩-١) ونحصل على قيمة معامل الانزلاق الذي تقع عنده قيمة النهاية العظمى لعزم الدوران ، كما فعلنا في المرة السابقة بمساواة $\frac{dT}{dS}$ بالصفر حيث نجد أن

$$S_m = \pm \frac{kR'_2}{\sqrt{[R_1^2 + (X_1 + k X'_{20})^2]}} \quad (1-42)$$

$$= \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_{20})^2}} \quad (1-43)$$

وبتعويض هذه القيمة للانزلاق S_m في المعادلة (٣٩-١) نحصل على قيمة النهاية العظمى لعزم الدوران T_m ، فنجد أن:

$$T_m = \frac{1.462 V_1^2}{kns} \frac{1}{R_1 + \sqrt{[R_1^2 + (X_1 + k X'_{20})^2]}} \quad (١ - ٤٤)$$

ونلاحظ من هذه المعادلة أن قيمة النهاية العظمى لعزم الدوران لا تتوقف على مقاومة ملفات العضو الدائر R_2 ولكنها تتوقف على X_1 ، R_1 و X'_{20} حيث تقل بالزيادة في قيمة أى من هؤلاء الثلاثة . كما أنها تتأثر أيضاً بقيمه X_0 الداخلة في تحديد قيمة المقدار k فنزداد بزيادة X_0 للحصول على قيمة النهاية العظمى لعزم الدوران عند البدء نضع $S_m = 1$ في المعادلة (١ - ٤٢) ونضيف إلى R_2 مقاومة البدء R_{st} التي تستخدم لتنفيذ الشرط المطلوب ، فنجد أن :

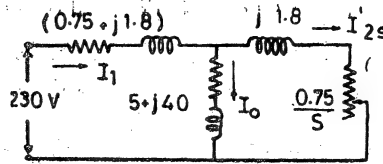
$$R'_2 + R_{st} = \frac{[R_1^2 + (X_1 + k X'_{20})^2]^{\frac{1}{2}}}{k}$$

وتكون قيمة مقاومة البدء R_{st} اللازم اضافتها إلى كل مرحلة من مراحل العضو الدائر للحصول على T_m عند البدء عبارة عن

$$R_{st} = \frac{[R_1^2 + (X_1 + k X'_{20})^2]^{\frac{1}{2}} - k R'_2}{k} \quad (١ - ٤٥)$$

مثال محلول :

The equivalent circuit of one phase of a star-connected, 3 - phase, 50 HZ, 4 pole slip-ring induction motor is given. Allowing 1% of the input for mechanical losses, calculate the line current, powerfactor and horse power of the motor at a slip of 4%



(شكل ١٦-١)

اعطيت في المسألة المعاوقة الكلية المكافئة للفرعين المتوازيين X_0 و R_0 ، وهي $(\frac{1}{Y_0} = Z_0 = 5 + j 40)$. وسوف نقوم في هذه الحالة بحل دائرة المحرك المكافئة المعطاة باستخدام قوانين الدوائر مباشرة، ودون الرجوع إلى القوانين المستنبطة (على أساس قوانين الدوائر أيضاً ولكن باستعمال Y_0) . فإذا كانت المعاوقة المرحلية الكلية لدائرة المحرك على الينبوع هي Z_t نجد أن

$$Z_t = 0.75 + j 1.8 + \frac{(5 + j 40) \left(\frac{0.75}{0.04} + j 1.8 \right)}{(5 + \frac{0.75}{0.04}) + j (40 + 1.8)}$$

$$= 0.75 + j 1.8 + 13.94 + j 7.4$$

$$= 14.69 + j 9.2 = 17.33 \angle 32^\circ 3'$$

ويكون تيار المدخل المرحلي للمحرك I_1 عبارة عن :

$$I_1 = \frac{V}{Z_t} = \frac{230}{17.33 \angle 32^\circ 3'} = 13.3 \angle - 32^\circ 3'$$

معامل القدرة : $\text{power factor } \cos \phi = \cos 32^\circ 3' = 0.8485$

وتكون قدرة المدخل للمحرك عبارة عن $3V I_1 \cos \phi$:

$$3 V I_1 \cos \phi = 3 \times 230 \times 13.3 \times 0.8485 = 7800 \text{ W}$$

$$P = 0.01 \times 7800 = 73 \text{ W} \quad \text{المفقودات الميكانيكية :}$$

نحصل على تيار العضو الدائر من التيار I_1 على النحو التالي :

$$I'_{2s} = I_1 \frac{Z_0}{Z'_{2s} + Z_0} = 13.3 \angle -32.3^\circ \times \frac{5 + j40}{23.75 + j41.8}$$

وتكون القيمة العددية لـ I'_{2s} عبارة عن :

$$I'_{2s} = 13.3 \times \frac{40.31}{48.07} = 11.15 \text{ amps}$$

وتكون قدرة الثغرة الهوائية P_g عبارة عن :

$$P_g = 3 (I'_{2s})^2 \frac{R'_2}{s} = 3 \times (11.15)^2 \times \frac{0.75}{0.04} = 6980 \text{ W}$$

ونحصل على القدرة الميكانيكية P_m على النحو التالي :

$$P_m = P_g (1 - S) = 6980 \times 0.96 = 6700 \text{ W}$$

وتكون قدرة المخرج P_2 عبارة عن :

$$P_2 = P_m - P_f = 6700 - 78 = 6622 \text{ W} = 8.89 \text{ HP}$$

(١٢-١) تشغيل المحركات التأثيرية ثلاثية المراحل على يذبوع غير متزن الضغط :

(Operation of Induction Motors on unbalanced volt supply)

يتم حل المسائل التي تحتوى على ضغوط أو تيارات غير متزنة عادة باستخدام نظرية المركبات المتماثلة (Theory of symmetrical Components) التي يمكن بواسطتها تحليل أية مجموعة ثلاثية (أو ثنائية) من الضغوط أو التيارات

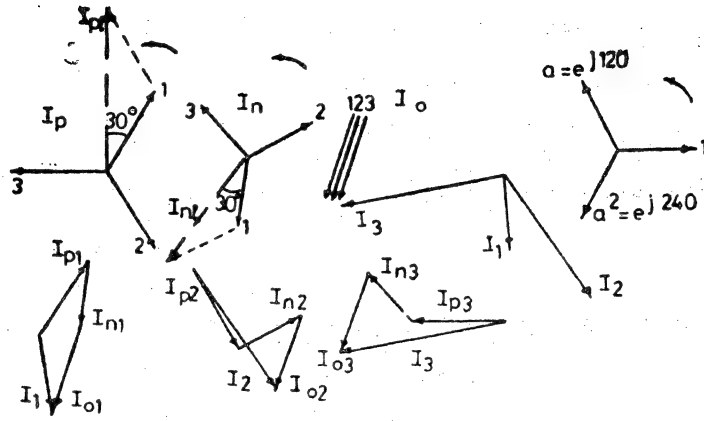
غير المتماثلة (unsymmetrical) إلى مجموعتين أو ثلاث من الضغوط أو التيارات المتماثلة يطلق عليها اسم المركبات المتماثلة (symmetrical Components) . ويكون لهذه المركبات المتماثلة مجمعة نفس التأثير والنتائج التي تعطيها المجموعة الأصلية من الضغوط أو التيارات غير المتماثلة ، ولكنها تمتاز عنها بأنه يمكن استخدام النظريات المعروفة مع كل منها على حدة باعتبارها مجموعة متماثلة تخضع لتطويع هذه النظريات . ويمكن بعد ذلك تجميع نتائج المركبات المتماثلة في الاتجاه المضاد للحصول على المجموعة غير المترنة الناشئة عن استخدام المجموعة غير المترنة الأصلية .

تتكون المركبات المتماثلة لمجموعة غير مترنة من ثلاث مجموعات على النحو التالي : (بالنسبة لمجموعات التيار على سبيل المثال) :

١ — مجموعة التعاقب المرحلي الموجب (The positive phase sequence) : وهي تتكون من ثلاثة مرتحات * (phasors) متساوية I_{p1} و I_{p2} و I_{p3} ذات تعاقب مرحلي ١ — ٢ — ٣ في الاتجاه الموجب مثل أى مجموعة مترنة للضغط أو التيار (شكل ١٧ - ١) .

٢ — مجموعة التعاقب المرحلي السالب (The negative phase sequence) : وهي تتكون من ثلاث مرتحات متساوية I_{n1} و I_{n2} و I_{n3} ذات تعاقب مرحلي ١ — ٢ — ٣ في الاتجاه الموجب ، أو نفس التعاقب المرحلي السابق ١ — ٢ — ٣ في الاتجاه السالب (شكل ١٧ - ٢) .

* استخدمت كلمة مرتحل (phasor) هنا للدلالة على الضغط أو التيار عندما يتغير لحظيا مع الزمن على منحنى جيبي ، وذلك بدلا من كلمة متجه (Vector) التي كانت تستخدم سابقا ، لأن أى من الضغط أو التيار ليس في الحقيقة كمية موجهة مثل القوة مثلا ، وإن أمكن تمثيل كل منها بطول محدد الاتجاه .



شكل (١٧ - ١)

٣ — مجموعة التعاقب المرحلي الصفري (Zero phase sequence system)
وهي تتكون من ثلاث مرتحات متساوية I_{01} ، I_{02} و I_{03} متفقة مرحليا أى
أن الاختلاف المرحلي بينها يساوى صفر .

فاذا كانت المجموعة غير المتزنة مكونة من المرتحات الثلاثة I_1 و I_2 و I_3 ،
وهي غير متساوية في القيمة ، والاختلاف المرحلي بين كل اثنين منها يختلف
عن ١٢٠ درجة (المجموعة المتزنة ذات قيم متساوية ، والاختلاف المرحلي
بين كل اثنين منها يساوى ١٢٠ درجة) فإن كل مرتحل من هذه المرتحات
الثلاث يساوى مجموع المرتحات المناظرة في المركبات المتماثلة أى أن :

$$I_1 = I_{p1} + I_{n1} + I_{01}$$

$$I_2 = I_{p2} + I_{n2} + I_{02}$$

$$I_3 = I_{p3} + I_{n3} + I_{03}$$

• • • (١ - ٤٦)

يبين شكل (١٧-١) كيف تتحقق صحة المعادلات (٤٦-١) بالرسم .
 فإذا كانت 1 ، a ، a^2 تكون مجموعة مرتحات ثلاثية متزنة طول كل منها
 الوحدة وبين كل اثنين منها اختلاف مرحلي ١٢٠ درجة كما هو مبين في شكل
 (٤٦-١) ، فإن هذا يعني أن ضرب أي مرتحل في a يكافئ ادارة هذا
 المرتحل ١٢٠ درجة في الاتجاه الموجب (عكس اتجاه عقرب الساعة) ، وضرب
 المرتحل في a^2 يكافئ إدارته ٢٤٠ درجة في الاتجاه الموجب أو ١٢٠ درجة
 في الاتجاه السالب (اتجاه عقرب الساعة) ، وفي هذه الحالة نجد أن:

$$\left. \begin{aligned} a &= e^{j 120} = (-0.5 + 0.866 j) \\ a^2 &= e^{j 240} = (-0.5 - 0.866 j) \\ a^3 &= e^{j 360} = 1 \\ a^4 &= a \times a^3 = a \\ 1 + a + a^2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (١-٤٧)$$

حيث a^2 ، a ، 1 هي الجذور التكعيبية الثلاثة للواحد الصحيح . فإذا
 كان I_p هو طول كل من مرتحات مجموعة التعاقب المرحلي الموجب ، I_n
 هو طول كل من مرتحات مجموعة التعاقب المرحلي السالب ، I_0 هو طول
 كل من مرتحات مجموعة التعاقب المرحلي الصفري ، نجد أن :

$$\left. \begin{aligned} I_{p1} &= I_p & I_{n1} &= I_n & I_{01} &= I_0 \\ I_{p2} &= a^2 I_p & I_{n2} &= a I_n & I_{02} &= I_0 \\ I_{p3} &= a I_p & I_{n3} &= a^2 I_n & I_{03} &= I_0 \end{aligned} \right\} \quad (١-٤٨)$$

وبالتعويض من (١ - ٤٨) في (١ - ٤٦) نحصل على المجموعة غير المترنة
 I_1, I_2, I_3 بدلا كل من I_0, I_n, I_p فقط على النحو التالي :

$$\begin{array}{l|l} I_1 = I_p + I_n + I_0 & \\ I_2 = a^2 I_p + a I_n + I_0 & \dots \dots (1-49) \\ I_3 = a I_p + a^2 I_n + I_0 & \end{array}$$

وبجمع هذه المعادلات الثلاثة نحصل على I_0 بدلالة I_1, I_2, I_3 حيث أن :

$$I_1 + I_2 + I_3 + = 3 I_0 \rightarrow I_0 = \frac{1}{3} (I_1 + I_2 + I_3) \dots (1-50)$$

وبجمع المعادلات (١ - ٤٩) مرتين بعد ضرب I_2 في a ، I_3 في a^2 ، ثم
 ضرب I_2 في a^2 ، و I_3 في a نجد أن :

$$\begin{array}{l} I_1 = I_p + I_n + I_0 \\ a I_2 = I_p + a^2 I_n + a I_0 \\ a^2 I_3 = I_p + a I_n + a^2 I_0 \\ \hline I_1 + a I_2 + a^2 I_3 = 3 I_p \rightarrow I_p = \frac{1}{3} (I_1 + a I_2 + a^2 I_3) \dots (1-51) \end{array}$$

$$\begin{array}{l} I_1 = I_p + I_n + I_0 \\ a^2 I_2 = a I_p + I_n + a^2 I_0 \\ a I_3 = a^2 I_p + I_n + a I_0 \\ \hline I_1 + a^2 I_2 + a I_3 = 3 I_n \end{array}$$

$$I_1 = \frac{1}{3} (I_1 + a^2 I_2 + a I_3) \dots \dots (1-52)$$

بذلك نجد أن المعادلات (١-٤٩) تعطى المجموعة غير المتزنة بدلالة المركبات المتماثلة، بينما تعطى المعادلات (١-٥٠)، (١-٥١)، (١-٥٢)، المركبات المتماثلة بدلالة المجموعة غير المتزنة. هذا، وإذ كانت المجموعة I_2, I_3 و I_1 متزنة نجد أن :

$$I_2 = a^2 I_1 , \quad I_3 = a I_1 \dots (1-53)$$

وبالتعويض من (١-٥٣) في المعادلات (١-٥٠)، (١-٥١)، (١-٥٢) نحصل على المركبات المتماثلة للمجموعة المتزنة وهي :

$$I_0 = \frac{1}{3} (I_1 + a^2 I_1 + a I_1) = \frac{1}{3} I_1 (a^2 + a + 1) = 0$$

$$I_n = \frac{1}{3} (I_1 + a I_1 + a^2 I_1) = \frac{1}{3} I_1 (1 + a + a^2) = 0$$

$$I_p = \frac{1}{3} (I_1 + I_1 + I_1) = I_1$$

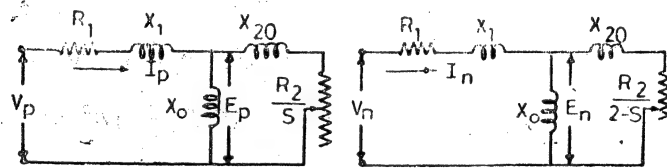
وهذا يعني أن أية مجموعة متزنة هي في الواقع عبارة عن مجموعة تعاقب مرحلي موجب. فإذا كانت المجموعة غير متزنة فقد يدخل في تركيبها مع مجموعة التعاقب المرحلي الموجب كل من مجموعتي التعاقب المرحلي السالب والتعاقب المرحلي الصفري أو أى منهما. وعندما تكون المجموعة موصلة نجمة، وتكون نقطة النجمة فيها معزولة بدون أى اتصال، فإن مجموع التيارات الداخلة والخارجة من هذه النقطة، على حسب قانون كيرشوف يساوى صفراً، ومن ثم فإن مجموع I_0, I_2, I_3 يساوى صفراً، مما يعني أن I_0 يساوى صفراً، وعدم وجود مجموعة تيارات صفرية في هذه الحالة.

أما إذا كانت المجموعة موصلة دللتا فان مجموعة التيارات الصفيرية لا يمكن أن تتواجد في تيارات الخطوط ، ولكن يمكن أن تتواجد مجموعة تيارات صفيرية كمركة لمجموعة التيارات المرحلية ، حيث تجد مسارها لها في الدلتا المقفلة ويكون تيار القصر المار في الدلتا الناشئ عن توافقيات الضغط من الدرجة الثالثة ومضاعفاتها في ملفات مولدات التيار المتردد مجموعة صفيرية ذات تردد ثلاثة أضعاف التردد الأساسي (راجع كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربائية صفحة ٧٧):

وبالنسبة لمجموعات الضغوط ، فإنه يمكن تحليلها على نفس النمط سواء كانت مجموعة ضغوط مرحلية أو مجموعة ضغوط خطية . وتجب ملاحظة أن المركبة الصفيرية لا يمكن أن تتواجد في مجموعة ضغوط خطية ، لأن مجموعها يساوي صفراً دائماً.

عند تغذية المحرك التأثيرى ثلاثى المراحل بمجموعة من الضغوط غير المترنة فاننا نستطيع تحليل هذه الضغوط إلى مركباتها المتماثلة ، ثم نطبق على كل من هذه المركبات على حدة ما سبق أن استخدمناه مع مجموعة الضغوط المترنة ، لكي نحصل على خواص تشغيل المحرك بفعل هذه المركبة بالذات ، وتكون خواص التشغيل الفعلية للمحرك هي عبارة عن خواص المركبات المتماثلة مجتمعة على أساس نظرية التجميع (Superposition) . ويمكن الحصول من المعلومات المعطاة عادة على مجموعتي التعاقب الموجب والسالب ، أما مجموعة التعاقب الصفيرى فانها تكون غير محددة ، ولكن نظراً أنه لا يمكن تواجد مجموعة تيارات صفيرية على أى الأحوال ، فإنه يمكن تجاهل وجود مجموعة التعاقب الصفيرى للضغط ، واستنباط خواص تشغيل المحرك على أساس مجموعتي التعاقب الموجب والسالب للضغط فقط . وفي هذه الحالة فان مجموعة التعاقب الموجب تؤدي إلى إنشاء مجال مغناطيسي أممي ، له نفس خواص

وتأثير المجال المغناطيسي الدائر في حالة مجموعة الضغوط المترنة ، وتكون للمحرك نفس الدائرة المكافئة بمعامل الانزلاق s ، كما هو مبين في شكل (٥ - ٢) ١ . أما مجموعة التعاقب السالب فإنها تعمل على إنشاء مجال مغناطيسي يدور في عكس اتجاه دوران العضو الدائر ، وهو مجال خلفي مماثل للمجال الخلفي في المحرك احادي المرحلة ، حيث يكون معامل الانزلاق الخاص به هو $(2 - s)$. وتكون الدائرة المكافئة للمحرك مع مجموعة التعاقب السالب مماثلة للدائرة المكافئة مع مجموعة التعاقب الموجب مع استخدام معامل الانزلاق $(2 - s)$ بدلا من s ، كما هو مبين في شكل (٢٥ - ٢) ١ مع اهمال R_0 في هذه الحالة واعتبار مفقودات الحديد جزءا من المفقودات الميكانيكية .



(شكل ٥ - ٢) ١

فاذا كانت مجموعة الضغوط المرحلية غير المتزنة هي V_1 و V_2 و V_3 نجد أن :

$$V_p = \frac{1}{3} (V_1 + a V_2 + a^2 V_3)$$

$$V_n = \frac{1}{3} (V_1 + a^2 V_2 + a V_3)$$

(١٢ - ٢) ...

وتكون V_p هي الضغط المرحلي لمجموعة التعاقب الموجب ، V_n الضغط المرحلي لمجموعة التعاقب السالب ، كما يكون I_p هو تيار التعاقب المرحلي الموجب ، I_n هو تيار التعاقب المرحلي السالب .

هذا ، وفي كثير من الأحيان تعطى الضغوط الخطية للمجموعة غير المتزنة وهي.

$$V_{12} = V_1 - V_2 , V_{23} = V_2 - V_3 , V_{31} = V_3 - V_1$$

وفي هذه الحالة نحصل أولا على الضغوط الخطية لمجموعة التعاقب الموجب وكذلك الضغوط الخطية لمجموعة التعاقب السالب على النحو السابق ، حيث نجد أن:

$$\begin{aligned} V_{p1} &= V_{p12} = \frac{1}{3} (V_{12} + a V_{23} + a^2 V_{31}) \\ V_{n1} &= V_{n12} = \frac{1}{3} (V_{12} + a^2 V_{23} + a V_{31}) \end{aligned} \quad (2-13)$$

وتكون العلاقة بين V_{p1} و V_p هي نفس العلاقة بين القيمة المرحلية والقيمة الخطية في المجموعه المتزنة ذات التعاقب المرحلي الموجب ، أى أن

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{3}} V_{p1} \text{ وهي متأخرة عن } V_{p1} \text{ مرحليا بمقدار } 30^\circ \text{ درجة ،}$$

$$\text{كما أن } V_n = \frac{1}{\sqrt{3}} V_{n1} \text{ وهي متقدمة عن } V_{n1} \text{ مرحليا بمقدار } 30^\circ \text{ درجة،}$$

وهذا كله واضح في شكل (١٧ - ١). بذلك يمكننا الحصول على كل من

$$V_{p1} , V_{n1} \text{ من الضغوط الخطية غير المتزنة من المعادلة (١٣ - ٢) ، ثم}$$

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{3}} V_{p1} \angle -30^\circ , V_n = \frac{1}{\sqrt{3}} V_{n1} \angle 30^\circ \quad (3-12)$$

مثال محلول :

Each phase of the rotor of a 3 - phase induction motor has a rsistance of 1 ohm and standstill reactance of 4 ohms, when

running from a symmetrical 3 phase 400 Volt supply at 5% slip, the torque determined is 20 ft-lb. Calculate the torque when running with the same speed having the following Voltages to neutral :

$$V_1 = 240 \angle 0^\circ, \quad V_2 = 183 \angle 229^\circ, \quad V_3 = 183 \angle 131^\circ$$

$$V_1 = 240$$

$$V_2 = 183 (- 0.655 - j 0.755) = - 120 - j 138$$

$$V_3 = 183 (- 0.655 + j 0.755) = - 120 + j 138$$

$$a = (- 0.5 + j 0.866) , \quad a^2 = (- 0.5 - j 0.866)$$

$$V_p = \frac{1}{3} \left[240 + (- 0.5 + j 0.866) (- 120 - j 138) \right. \\ \left. + (- 0.5 - j 0.866) (- 120 + j 138) \right]$$

$$\underline{\underline{= 199.7 \text{ V}}}$$

$$V_n = \frac{1}{3} \left[240 + (- 0.5 - j 0.866) (- 120 - j 138) \right. \\ \left. + (- 0.5 + j 0.866) (- 120 + j 138) \right]$$

$$\underline{\underline{= 40.33 \text{ V}}}$$

$$I_p = \frac{V_n}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{20}^2}} = \frac{199.3}{\sqrt{\left(\frac{1}{0.05}\right)^2 + 4^2}} = 9.8 \text{ A}$$

$$I_n = \frac{V_n}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{2-s}\right)^2 + X_{20}^2}} = \frac{40.33}{\sqrt{\left(\frac{1}{2-0.05}\right)^2 + 4^2}} = 10 \text{ A}$$

وذلك على أساس إهمال هبوط الضغط في معاوقة العضو الثابت بالنسبة لكل من مجموعتي التعاقب ، واستخدام العلاقات المقربة ، وذلك بسبب عدم معرفة قيمة R_1 , X_1 , X_0 ، وإلا فقد كان يمكننا استخدام العلاقات الخاصة بالدائرة المكافئة المضبوطة . يمكننا أن نضع معادلة عزم الدوران بالشكل الآتي :

$$T \propto \frac{I_2^2 R_2}{S} = K \frac{I_2^2}{S}$$

وعند استخدام الضغوط الخطية المترنة ٤٠٠ فولت نجد أن :

$$I_2 = \frac{400/\sqrt{3}}{\sqrt{\left(\frac{1}{0.05}\right)^2 + 4^2}} = \frac{400/\sqrt{3}}{\sqrt{416}}$$

$$20 = K \frac{I_2^2}{S} = K \frac{(400)^2}{416 \times 3 \times 0.05}$$

$$K = \frac{0.05 \times 20 \times 3 \times 416}{160000} = 78 \times 10^{-4}$$

ونحصل على عزم الدوران في حالة الضغوط غير المترنة من فرق عزمي الدوران الناشئين عن المجالين الأمامي والخلفي نحصل عليه في حالة المحرك احادي المرحلة ، وذلك على النحو التالي :

$$\begin{aligned} T &= T_f - T_b = K \left[\frac{I_p^2 R_2}{s} - \frac{I_n^2 R_2}{(2-s)} \right] \\ &= 78 \times 10^{-4} \left[\frac{(9.8)^2 \times 1}{0.05} - \frac{(10)^2 \times 1}{1.95} \right] \\ &= 14.85 \text{ lb. ft} \end{aligned}$$

البناء المتتابع

تشغيل المحركات التآثيرية ثلاثية مراحل

Operation of three-phase Induction Motors

تشتمل دراسة تشغيل المحركات التآثيرية ثلاثية المراحل على ثلاثة موضوعات رئيسية هي ، على التوالي ، طرق بدء دوران المحرك (methods of starting) وطرق تغيير سرعة المحرك (methods of speed control) وطرق تغيير معامل القدرة للمحرك (methods of varying the power factor) .
وتتم دراسة الموضوعين الأخيرين عادة في إطار واحد ، حيث نجد أن تغيير السرعة يكون مصحوبا ببعض التأثير على معامل القدرة في أحيان كثيرة ، كما أن تغيير معامل القدرة قد لا يتأتى إلا بالتأثير على السرعة في أحيان أخرى .
لذلك نرى أنه من الأنسب أن نقسم دراسة تشغيل المحركات التآثيرية ثلاثية المراحل إلى قسمين أساسيين هما بدء دوران المحرك ، ثم تغيير سرعة المحرك والتحكم في معامل قدرته ، كما سوف يرد فيما يلي .

أولا - طرق البدء في المحركات التآثيرية ثلاثية المراحل

(Starting of 3-phase Induction Motors)

يتبين لنا من مراجعة المعادلة (٢٩ - ١) في الباب الأول أن قيمة تيار البدء المرحلي الذي يسحبه المحرك ، عند توصيله إلى اللينوع توصيلا مباشرا ، لحظة بدء دورانه ، تتناسب طرديا مع الضغط المرحلي للينوع ، وعكسيا مع المعاوقة المرحلية الكلية المكافئة لدائرة المحرك منسوبة إلى الجانب الابتدائي . ويطلق على التيار الذي ينشأ عن استخدام التوصيل المباشر (Direct Switching)

اسم تيار دائرة القصر (Short circuit current) للمحرك ، ويكون هو نفسه عبارة عن تيار البدء في هذه الحالة ، كما تساوى قيمته عدة مرات قيمة تيار الحمل الكامل للمحرك . ويعتبر المحرك في حالة دائرة قصر عند البدء ، على هذا المنوال ، لأن قيمة المقاومة التي تتبدد فيها القدرة المكافئة للحمل الميكانيكي ، وهي $R'_2 \left(\frac{1-s}{s} \right)$ تساوى صفراً ، لأن s تساوى الواحد الصحيح .

ومن ناحية أخرى فإن عزم دوران المحرك عند البدء T_{st} ، باستخدام طريقة التوصيل المباشر ، تتوقف على قيمة تيار البدء I_{st} المشار إليها سابقاً ، وعلى قيمة المقاومة المرحلية للعضو الدائر R'_2 (كل القيم منسوبة إلى الجانب الابتدائي ناحية اليزنوع) . وبالرجوع إلى المعادلات (١٢-١) ، (١٤-١) ، (١٦-١) وتطبيقها في حالتى البدء والحمل الكامل نجد أن T_{st} و T_{fl} :

$$T_{st} = \frac{P_{g\ st}}{2 \pi \frac{n_s}{60}} = \frac{3}{2 \pi \frac{n_s}{60}} I_{st}^2 \frac{R'_2}{1} = k_t I_{st}^2 R_2$$

$$T_{fl} = \frac{P_{g\ fl}}{2 \pi \frac{n_s}{60}} = \frac{3}{2 \pi \frac{n_s}{60}} I_{fl}^2 \frac{R'_2}{S_{fe}} = R_t I_{fl}^2 \frac{R'_2}{S_{fe}}$$

$$\therefore T_{st} = T_{fl} \left(\frac{I_{st}}{I_{fe}} \right)^2 S_{fl} \quad (٢-١)$$

وهذا يعنى أنه إذا كان التوصيل المباشر للمحرك على اليزنوع يعطى تيار بدء تتراوح قيمته بين ثلاث وخمس مرات قيمة تيار الحمل الكامل ، فإن عزم دوران البدء الذى نحصل عليه من المحرك في هذه الحالة تتراوح قيمته ما بين ثلاثون وثمانون فى المائة من عزم دوران الحمل الكامل ، باعتبار أن

معامل الانزلاق عند الحمل الكامل يزيد قليلا على ثلاثة في المائة ، وهو متوسط القيم المعتادة . وإلى جانب ذلك فإن أى اتجاه نحو تقليل قيمة تيار البدء مع استمرار استخدام طريقة التوصيل المباشر (كتقليل ضغط الينبوع V_1 مثلا) سوف يؤدي إلى هبوط ملحوظ في قيمة عزم دوران البدء للمحرك بالنسبة إلى عزم دورانه عند الحمل الكامل ، وهو أمر غير مرغوب فيه في معظم الأحيان .

يتعين علينا أن نناقش في هذه المرحلة عيوب تيار البدء الكبير الناشئ عن التوصيل المباشر . إذا كان المحرك كبيرا نسبيا (مقنن قدرته بضع عشرات من الأحصنه) ، فإن الأجزاء الدوارة فيه (وخصوصا إذا كان الحمل مرتبط بعمود الادارة من قبل البدء) تحتاج إلى وقت ملحوظ (بضع عشرات من الثواني على الأقل) حتى تصل إلى قرب السرعة المعتادة . وهذا يعنى أن تيار البدء الكبير سوف ينتج كميات كبيرة من الحرارة في ملفات العضو الدائر قبل أن تهبط قيمته إلى المستوى الذى يعطى حرارة يمكن لهذه الملفات تبديدها دون أن يلحق بها عطب ، نتيجة للارتفاع الزائد في درجة حرارتها . أما إذا كان المحرك صغيرا نسبيا (مقنن قدرته لا يزيد عن بضعة أحصنه على أكثر تقدير) ، فإن الأجزاء الدوارة فيه (وخصوصا إذا كان البدء بدون حمل) تدرك السرعة المعتادة في وقت لا يتيسر لتيار البدء أن يولد فيه كمية من الحرارة ، يمكن أن ترفع درجة حرارة ملفات العضو الدائر بصورة خطيرة . ولكننا نجد أن تيار البدء الكبير ، الذى يصل إلى المحرك في جميع الأحوال عن طريق خط توزيع قدرة رئيسى ، قد يسبب قلقا للمشرفين على صيانة هذا الخط ، بما يسببه هذا التيار الكبير (مع أمثاله من التيارات المحتملة التى تسحبها محركات مماثلة تتغذى من نفس الخط) من هبوط في الضغط وتسخين زائد في الخط . لذلك نجد أنه حتى عندما يكون المحرك قادرا على استيعاب تيار البدء الكبير ، بدون خوف على ملفات عضوه الدائر ، فإننا نكون ملزمين بالحد من قيمة تيار البدء الذى يسحبه المحرك من الخط ، باعتبار بنود الاتفاق المبرم بيننا وبين أصحاب هذا الخط .

أما في الحالات التي تتولد فيها كميات من الحرارة ، بخشي من تراكمها على العضو الدائر الناشئة فيه ، فإن هذا يعيننا في المقام الأول بالنسبة للمحركات ذات القفص السنجابي ، حيث أننا في حالة المحركات ذات الحلقات الانزلاقية نستخدم مقاومات خارجية ، موصلة إلى ملفات العضو الدائر ، للحد من قيمة تيار البدء ، فتكون مقاومات البدء هذه هي المسئولة عن تبديد الجزء الأكبر من كميات الحرارة الزائدة المتولدة في خلال عملية البدء . وتزداد كميات الحرارة التي ترفع من درجة حرارة القفص السنجابي ، بصورة مزعجة في خلال فترة بدء المحرك ، إذا كان عمود إدارة المحرك مرتبطاً بالحمل (motor Shaft coupled to load) منذ البداية ، وكان الحمل يمتلك عزم قصور ذاتي كبير . وفي هذه الحالة قد تؤدي الاجهادات الناشئة عن استطالة قضبان القفص السنجابي بتأثير الحرارة إلى تلفه (damaged) . لذلك يجدر بنا ، في هذه المرحلة ، أن نبحث عن العلاقة بين كميات الحرارة المتولدة في خلال فترة بدء المحرك ذي القفص السنجابي ، وبين مقدار عزم القصور الذاتي للكتل الموجودة على عمود إدارته في هذه الفترة ، وغير ذلك من العوامل الأخرى التي لا بد وأن تكون ذات تأثير حيوي في هذا المجال ، مثل قدرة المحرك وثابت الزمن الميكانيكي له (mechanical time Constant) (للتعرف على هذا الثابت راجع كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربائية للمؤلف ص ١٦٨ ، ٢٦٩) .

يرتبط عزم الدوران T (كيلو جرام متر (Kg.m)) بعزم القصور الذاتي للكتل الموجودة على عمود الإدارة J (كيلو جرام / متر ثانية^٢) (Kg/m Sec²) ، مع السرعة الزاوية ω (زاويه نصف قطرية / ثانية) (radian/Sec) عند لحظة t (ثانية) (Sec.) بالمعادلة المعروفة :

$$T = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2-2)$$

ويكون مقدار القدرة المنقولة عبر الثغرة الهوائية P_g ، التي تغذي دائرة

العضو الدائر ، بالوات عبارة عن $P_g = T\omega_0$ ، حيث ω_0 هي سرعة التزامن الزاوية للمحرك . وتستنفذ هذه القدرة في تعجيل عمود إدارة المحرك عند السرعة ω بالجزء P_a ، وفي مفقودات العضو الدائر الكهربائية بالجزء L_2 ، الذي يتبدد في شكل حرارى . وعندما تكون سرعة العضو الدائر ω ، فإن طاقة حركته W_k تساوى $\frac{1}{2} J \omega^2$ جول ، وفي هذه الحالة نجد أن :

$$P_a = \frac{dW_k}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{1}{2} J \omega^2 = J \omega \frac{d\omega}{dt} = T\omega \quad \dots (٢-٣)$$

$$J \omega d\omega = T\omega dt$$

وبالنسبة لمفقودات العضو الدائر L_2 عند السرعة ω ، التى تتحدد بال لحظة ١ ، نجد أن :

$$L_2 = S P_g = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} T\omega_0 = T(\omega_0 - \omega) = \frac{dW_2}{dt} \quad (٢-٤)$$

حيث W_2 هي كمية الطاقة بالجول ، التى تبدد على شكل حرارة في العضو الدائر . وبذلك يكون :

$$P_g = P_a + L_2$$

$$T\omega_0 = T\omega + T(\omega_0 - \omega) \quad \dots \dots \dots ب (٢-٤)$$

$$\therefore \int_0^{t_s} T\omega_0 dt = \int_0^{t_s} T\omega dt + \int_0^{t_s} T(\omega_0 - \omega) dt$$

$$\dots \dots \dots (٢-٥)$$

وفي هذه الحالة تكون t_s هي زمن تعجيل عمود الادارة ، من السكون حتى يصل إلى السرعة ω ، بالثانية ، ويكون الطرف الايسر من المعادلة

(٥-٢) عبارته عن الطاقة W_g جول التي تمر عبر الثغرة الهوائية في خلال فترة التعجيل ، والتي تنقسم إلى الجزئين W_k و W_2 ، كما يمثلها حدى الطرف الايمن للمعادلة . عند $t = t_*$ تكون $\omega = \omega_0$ ، وبذلك يمكن كتابة المعادلة (٥-٢) ، بالتعويض من المعادلة (٣-٢) ، على النحو الآتي :

$$\int_0^{\omega_0} J \omega_0 d\omega = \int_0^{\omega_0} J \omega d\omega + \int_0^{\omega_0} J (\omega_0 - \omega) d\omega$$

$$\therefore J \omega_0^2 = \frac{1}{2} J \omega_0^2 + J \omega_0^2$$

$$W_g = W_k + W_2$$

... (٦-٢)

وهكذا يتضح من المعادلة (٦-٢) ، بالمقارنة ، أن كمية الطاقة W_g أو $J \omega_0^2$ جول ، التي تمر عبر الثغرة الهوائية إلى المخرج في خلال فترة التعجيل تنقسم إلى قسمين متساويين هما $W_k = \frac{1}{2} J \omega_0^2$ جول ، $W_2 = \frac{1}{2} J \omega_0^2$ جول ، كما سبق تعريفها . وهذا يؤكد ما سبق قوله من أن كمية الحرارة التي تبدد في العضو الدائر أثناء بدء دوران المحرك تزداد بشكل مزعج إذا دار المحرك وهو مرتبط ميكانيكياً بحمل ذى عزم قصور ذاتى كبير . ونظراً لأن ثابت الزمن الميكانيكى θ_m للمحرك يتناسب طردياً مع عزم القصور الذاتى للكتل الموجودة على عمود الادارة ، فإنه يمكن اثبات علاقة مماثلة بين θ_m و W_k على النحو التالى ،

$$\theta_m = \omega_0 \frac{J}{T} = \omega_0^2 \frac{J}{P_g} \stackrel{S}{=} \omega_0^2 \frac{J}{P_n} \dots \dots (٧-٢)$$

(راجع تعريف θ_m فى الآلات الكهربائية وتصميمها صفحة ٢٦٩)

$$\therefore W_2 = \frac{1}{2} \omega_0^2 J = \frac{1}{2} P_g \theta_m \stackrel{S}{=} \frac{1}{2} P_n \theta_m \quad (٨-٢)$$

حيث P_n هي مقنن قدرة المحرك . ويمكن الحصول على القيمة المقربة لـ W_2 من المعادلة (٨ - ٢) بالتعويض عن P_n بقدرة المدخل أو بقدرة المخرج للمحرك . ففي الحالة الأولى نحصل على قيمة أعلى قليلا من القيمة الحقيقية ، وفي الثانية على قيمة أقل .

مثال :

A 4 Pole 50 HZ Synchronous motor , driving a Compressor , has an output of 5200 KW. Weight of the damper winding (steel) is 400 Kgs. GD^2 of the motor and Compessor is 18 t.m². Specific heat of Steel is 482 Joules / Kg. 1°C. Find the temprature rise of the damper Winding .

تعمل ملفات التخميد كقفص سنجابي في أثناء فترة البدء للمحرك المتزامن ، حيث يتخذ المحرك خواص تشغيل المحرك المؤثري في خلال ذلك . وعلى هذا الأساس نجد أن كمية الحرارة المتولدة في خلال فترة البدء ، والتي تمثلها W_k ، تتركز في ملفات التخميد فترفع حرارتها إلى درجات عالية ، قد تسبب لنا المشاكل ، كما سنرى من حل المثال السابق .

$$P_n = 5200 \text{ KW} , \quad n_0 = \frac{60 \times 50}{2} = 1500 \text{ r. p. m.}$$

باستخدام المعادلة (١٧ - ٥) صفحة ٢٦٩ من كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربائية . لاجتاد قيمة θ_m من المعلومات المعطاة في المسألة :

$$\theta_m \approx \frac{GD^2}{36.5} \left(\frac{n_0}{100} \right)^2 \cdot \frac{1}{P_n} = \frac{18000}{36.5} \cdot 15^2 \cdot \frac{1}{5200} \\ = 21.2 \text{ secs}$$

$$W_2 \approx \frac{1}{2} \theta_m P_n \approx \frac{1}{2} \times 5200 \times 21.2 \approx 57000 \text{ KW sec} \\ \approx 1.6 \text{ KWH}$$

باعتبار أن كل سعر (Calory) يساوى 0.427 Kg.m., وأن كل كيلو جرام

متر يساوى 9.81 Joules ، نجد أن

$$1 \text{ Calory} = 0.427 \text{ Kg. m.} = 0.427 \times 9.81 = 4.184 \text{ Joules}$$

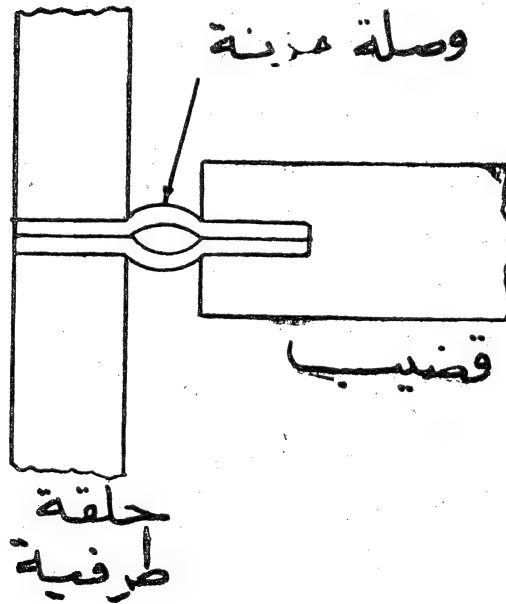
إذا كانت C هي مقدار الارتفاع في درجة حرارة ملفات التخميد درجة

مئوية ، نجد أن

$$W_2 = 400 \times 482 \times C \text{ Joules}$$

$$\therefore C = \frac{57000}{400 \times 482} = 285^\circ \text{ C}$$

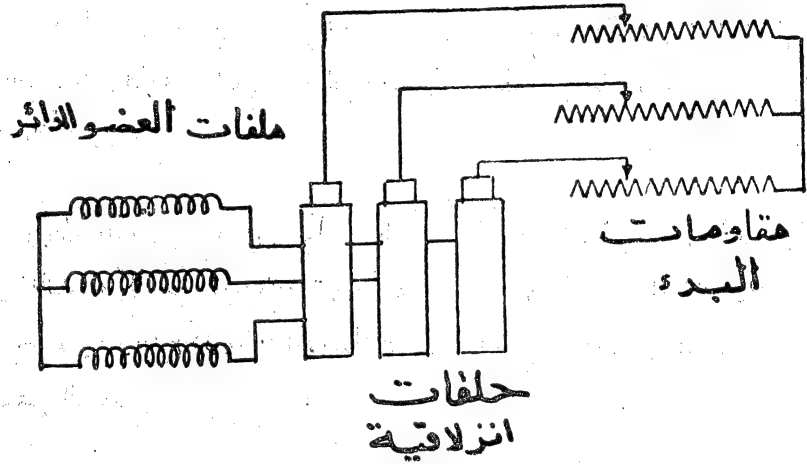
تؤكد هذه النتيجة ضرورة اتخاذ احتياطات خاصة ، بالنسبة للملفات التخميد في مثل هذه الأحوال ، حتى لا تؤدي الاجهادات الناشئة عن تمدد القضبان ، بسبب درجات الحرارة العاليه ، إلى إحداث تلف بها . لذلك نجد أن قضبان التخميد تتصل بحلقاتها الطرفية (end rings) في مثل هذا النوع من المحركات بوصلات مرنة تسمح لها بالتمدد دون حدوث اجهادات ضارة ، كما هو مبين في شكل (١ - ٢) .



(شكل ١ - ٢)

(٢-١) استخدام مقاومات بدء موصلة على التوالي مع ملفات العضو الدائر في المحركات ذات الحلقات الانزلاقية:

يؤدي توصيل مقاومة ثلاثية المراحل ، ذات قيمة R_{st} لكل مرحلة ، على التوالي مع ملفات العضو الدائر (شكل ٢-٢) ، إلى الحد من قيمة تيار البدء المرحلي المسحوب من الشبكة . I_{st}



(شكل ٢-٢)

$$I_{st} = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2 + R'_{st})^2 + (X_1 + X'_{20})^2}} \quad \dots (٢-٩)$$

$$\phi_{st} = \tan^{-1}(X_1 + X'_{20}) / (R_1 + R'_2 + R'_{st})$$

وإلى جانب الحد من قيمة تيار البدء المرحلي ، فإن المقاومة R_{st} (R'_{st}) منسوبة إلى العضو الثابت) ترفع قيمة معامل القدرة عند البدء ، كما يتضح من المعادلة (٢-٩) ، وهذا يعني زيادة عزم دوران البدء ، كما سبق شرحه

بالإشارة إلى المعادلة (٢٢ - ١) ، وشكل (٤ - ١) ، حيث تبين أننا نستطيع أن نحصل على قيمة النهاية العظمى اعزم الدوران عند البدء باختيار قيمة R_{st} تساوى $(X_{20} - R_2)$.

بارتفاع سرعة المحرك تقل الحاجة إلى وجود المقاومة R_{st} في دائرة ملفات العضو الدائر ، ولذلك فإنها تقلل تدريجياً ، مع ازدياد سرعة المحرك حتى تخرج من الدائرة نهائياً عندما يصل المحرك إلى سرعة دورانه المعتادة ، فتقصر ملفات العضو الدائر على الفرش مباشرة ، ثم ترفع الفرش ، مع عمل دائرة القصر على الحلقات الانزلاقية نفسها باستخدام قضيب من النحاس يمر فيها من واحدة إلى الأخرى .

ويلاحظ أن جزءاً من الطاقة W_k ، التي تتبدد في شكل حرارى خلال فترة البدء ، كما سبق شرحه ، يتولد في مقاومة البدء ، بعيداً عن العضو الدائر ، مما يحد من ارتفاع درجة حرارة ملفات العضو الدائر ، بالمقارنة بما يحدث في القفص السنجابى .

(٢ - ٢) طرق البدء المستخدمة مع محركات القفص السنجابى:

يمثل القفص السنجابى دائرة ملفات ثلاثية المراحل (فى المحركات ثلاثية المراحل) مقللة ، لا يمكن توصيل مقاومات ، أو أى شئ آخر معها . لذلك يتعين علينا فى هذه الحالة أن نولى وجهنا شطر ملفات العضو الثابت ، أو الملفات الابتدائية الموصلة إلى الينبوع ، وذلك إذا أردنا اتخاذ أى إجراء من شأنه الحد من ارتفاع قيمة تيار البدء للمحرك . ومن الواضح ، بمراجعة المعادلة (٢ - ٩) ، أننا نستطيع إضافة المقاومة R_{st} إلى ملفات العضو الثابت للحد من قيمة تيار البدء . ولكننا نحصل فى هذه الحالة على انخفاض كبير فى قيمة عزم دوران البدء للمحرك ، على عكس ما حدث فى الحالة السابقة ، كما أن مفقودات الطاقة فى مقاومة البدء تكون كبيرة بمقارنتها بالحالة السابقة . ويمكن

تفسير ذلك إذا لاحظنا أن الضغط المرحلي لليدوع V_1 ينقسم إلى جزءين ، أحدهما يمتص في مقاومة البدء ، والآخر هو الذى يغذى المحرك . وهذا يعنى أن الضغط على أطراف المحرك قد قل بدرجة قد تكون كبيرة ، مما يؤدي إلى انخفاض قيمة الفيض المغناطيسى في الثغرة الهوائية ، علاوة على انخفاض قيمة التيار .

وفي الواقع أننا لا نملك إلا أن نخفض قيمة الضغط على المحرك ، إذا أردنا خفض قيمة تيار البدء ، مع هذا النوع من المحركات ، مع التجاوز عما ينشأ عن ذلك من انخفاض في قيمة عزم دوران البدء . ولكننا نحاول ، مع ذلك ، أن لا يصحب انخفاض قيمة الضغط الموصل على أطراف المحرك عند البدء مفقودات جانبية في القدرة ، كما يحدث عند استخدام المقاومات ، أو انخفاض معيب في معامل قدرة المحرك ، كما يحدث عند استخدام الملفات الحثية (Choke Coils) . ومن الطرق التي تستخدم في هذا المظهر طريقتان تقايدتان وشائعتان وهما :

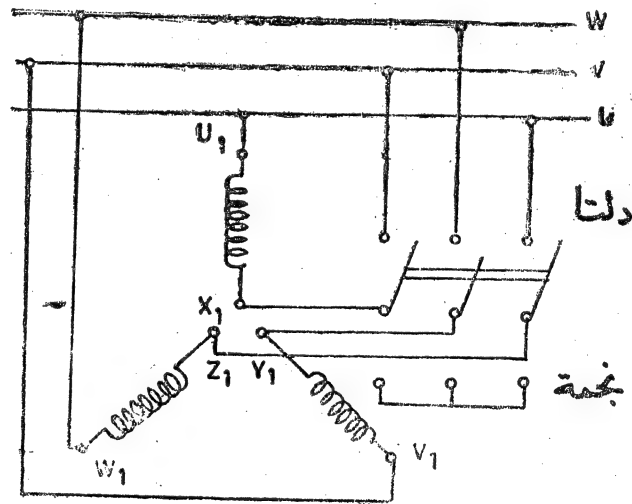
١ — استخدام مفتاح نجمة / دلتا لبدء المحرك (use of Star / delta Switch)

٢ — استخدام محول ذاتي لبدء المحرك (use of auto - transformer)

(٢ - ٣) بدء المحرك ذي القفص السنجاني باستخدام مفتاح نجمة / دلتا :

لكي يمكن استخدام هذه الطريقة يتعين أن تكون ملفات العضو الثابت للمحرك موصلة أصلاً دلتا (Stator delta Connected) . وهذا يعنى أن ملفات كل مرحلة من مراحل العضو الثابت تكون موصلة على الضغط الخطي لليدوع في خلال فترة التشغيل المعتادة للمحرك . لذلك نستطيع خفض قيمة الضغط على ملفات المرحلة الواحدة بنسبة $(\sqrt{3} : 1)$ ، أو إلى 57%

من القيمة المعتادة ، إذا قمنا بترتيب توصيل الملفات على شكل نجمة في خلال فترة البدء ، ثم أعدنا توصيلها دلتا عندما يصل المحرك إلى قرب السرعة المعتادة . وهذا هو فعلا ما يقوم به مفتاح نجمة / دلتا بالنسبة لعملية بدء المحرك ، فهو يربط توصيل الملفات نجمة في أحد وضعيه ، وهو الخاص بالبدء ، ثم يعيد توصيلها إلى الينبوع في حالتها الطبيعية دلتا ، في وضعه الآخر ، عند نهاية فترة البدء . ويراعى أن يكون نقل المفتاح من الوضع الأول إلى الوضع الثاني بأكبر سرعة ممكنة حتى لا تبطل سرعة المحرك في أثناء ذلك بشكل ملحوظ ، عندما يصبح غير موصل إلى الينبوع على الإطلاق . كذلك يزود المفتاح باصبع مانع (locking pin) ، وكامة يرتكز عليها هذا الاصبع حالما ينتقل المفتاح من وضعه الأول ، لكي لا يمكن أن يستقر المفتاح في أى من وضعيه المذكورين عفوا ، دون ترتيب وضع الاصبع والكامة في وضعها القديم . كذلك تكون سرعة النقل بين الوضعين لازمة حتى ينتقل المفتاح إلى الوضع الثاني قبل أن تسقط الكامة متعاقبة مع الاصبع في وضع المنع



(شكل ٣ - ٢)

المذكور . يبين شكل ٣ - ٢ تفصيلات ترتيب التوصيلات فى حالة استخدام مفتاح نجمة / دلتا ، موضحة على حسب الشرح السابق .

لا بد أن يثير اهتمامنا الآن مسألتان هامتان ، وهما : (أولا) مدى الانخفاض فى قيمة تيار البدء الذى يسجبه المحرك من الخط ، فى هذه الحالة ، بالنسبة لقيمة تيار البدء الذى يسجبه المحرك من الخط ، عندما يوصل توصيلا مباشرا عليه ، وهو الذى يمثل فى الواقع تيار القصر للمحرك . (ثانيا) نسبة عزم دوران بدء المحرك ، عندما يستخدم المفتاح ، إلى عزم دوران بدء المحرك فى حالة التوصيل المباشر .

(أولا) تيار البدء فى حالة استخدام المفتاح نجمة / دلتا : نفرض أن المعاوقة المرحلية المكافئة للمحرك ، منسوبة إلى الجانب الابتدائى ، هى Z_m - الضغط الخطى للذبوع V ، والضغط المرحلى V_{ph} - تيار البدء فى الخط I_{Ls} ، عند استخدام المفتاح ، وهى يساوى تيار البدء فى المحرك I_{pi} - تيار البدء فى الخط فى حالة التوصيل المباشر I_{Ld} ، وهو نفسه كما سبق أن ذكرنا تيار القصر المسحوب من الخط - تيار البدء فى المحرك I_{phd} ، وهو نفسه تيار القصر للمحرك I_{sc} .

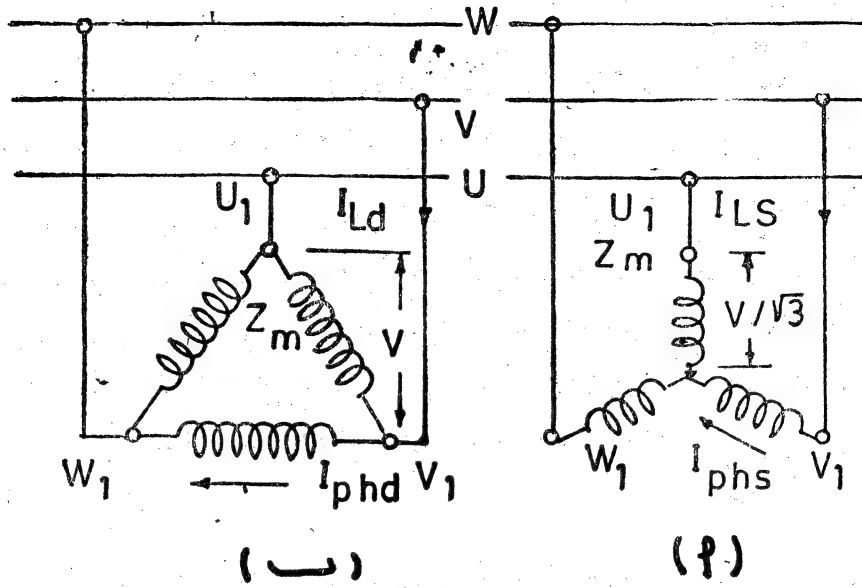
عندما يكون المفتاح فى وضع البدء تكون ملفات العضو الثابت للمحرك موصلة نجمة على الينبوع (شكل ٤ - ١٢) . وفى هذه الحالة نجد أن :

$$I = I_{phs} = \frac{V_{ph}}{Z_m} = \frac{V}{\sqrt{3} Z_m} \dots \dots \dots (٢-١٠)$$

فى حالة التوصيل المباشر ، أى بدون استخدام المفتاح ، نجد أن :

$$I_{Ld} = \sqrt{3} I_{phd} = \sqrt{3} \frac{V}{Z_m} \dots \dots \dots (٢-١١)$$

(من ٢-١) ، (٢-١١) نجد أن :



(شكل ٤-١٢، ب)

$$I_{LS} / I_{Ld} = \frac{V}{\sqrt{3} Z_m} / \frac{V}{Z_m} = 1/3 \quad \dots (٢-١٢)$$

وهذا يعنى أن خفض قيمة الضغط المرحلى الموصل إلى ملفات المحرك بنسبة ($1 : \sqrt{3}$) ، نتيجة لتوصيل هذه الملفات على الينبوع نجمة بدلا من دلتا عند البدء ، قد أدى إلى خفض قيمة تيار البدء المسحوب من الينبوع بنسبة الثلث ($1 : 3$) .

(ثانيا) عزم دوران البدء في حالة استخدام المفتاح نجمة / دلتا : إذا فرضنا أن عزم دوران البدء في حالة استخدام المفتاح هو T_s ، وأن عزم دوران البدء في حالة التوصيل المباشر هو T_d نجد أن .

$$T_s / T_d = (I_{phs})^2 / (I_{phd})^2 = \frac{V^2}{3 Z_m^2} / \frac{V^2}{Z_m^2} = 1/3$$

(٢-١٣)

أى أن عزم الدوران ينخفض بنفس نسبة انخفاض تيار الخط عند استخدام المفتاح . وهذا مالا حيلة لنا فيه ، مقابل الانتفاع بميزة انخفاض تيار الخط عند البدء ، بدون حدوث مفقودات قدرة جانبية . لذلك يجب مراعاة أن يكون عزم دوران البدء عاليا نسبياً في المحركات ذات القفص السنجابي أصلاً ، وهو ما يؤخذ في الاعتبار فعلاً عند تصميم هذا النوع من المحركات . هذا ولا يجب أن ننسى أن استعمال مفتاح البدء بنجمة/ دلتا يستلزم أن يكون التوصيل الأصلي للملفات المحرك دلتا ، فإذا كانت توصيل في وضع التشغيل المعتاد نجمة ، فلا يمكن استخدام هذا المفتاح . وفي هذه الحالة يمكن استخدام المحول الذاتي ، وهي الطريقة الثانية الشائعة الاستعمال في بدء محركات القفص السنجابي .

(٤ - ٢) بدء المحرك ذي القفص السنجابي باستخدام المحول الذاتي :

تقوم فكرة استخدام المحول الذاتي ، في هذا المظهر ، على نفس الأساس الذي تقوم عليه فكرة استخدام مفتاح نجمة دلتا ، من حيث القدرة على خفض تيار البدء في الخط بدرجة مضاعفة من نسبة الخفض في الضغط عن طريق التحويل ، وبدون حدوث مفقودات قدرة جانبية . توصيل ملفات المحرك (سواء كانت موصلة نجمة أو دلتا) ، كما هو مبين في شكل (٥ - ٢) ، إلى جانب الضغط المنخفض في محول ذاتي ، يكون جانب الضغط المرتفع فيه موصول إلى الينبوع . فإذا كان الضغط الخطي للينبوع هو V ، مثل الحالة السابقة ، وكان المحول يخفض الضغط بنسبة x (تكون x كسراً في هذه الحالة) ، يصبح الضغط الخطي الموصول إلى ملفات المحرك هو xV . فإذا كان التيار الخطي الذي يسحبه المحرك في هذه الحالة هو I_{sm} ، فإن التيار المسحوب من الخط على الجانب الآخر من المحول الذاتي I_{sa} يساوي xI_{sm} حيث .

$$\frac{I_{sa}}{I_{sm}} = \frac{xV}{V} = x \quad (١٤ - ٢)$$

وإذا كان I_{sc} هو التيار الذي يسحبه المحرك لحظة البدء عندما يكون موصلاً توصيلاً مباشراً على اليزبوع بالضغط الخطى V ، وهو تيار القصر للمحرك ، كما سبق ذكره نجد أن :

$$\frac{I_{sa}}{I_{sm}} = \frac{V}{xV} = \frac{1}{x} \quad (٢-١٥)$$

من (٢-١٤) و (٢-١٥) يتضح أ :

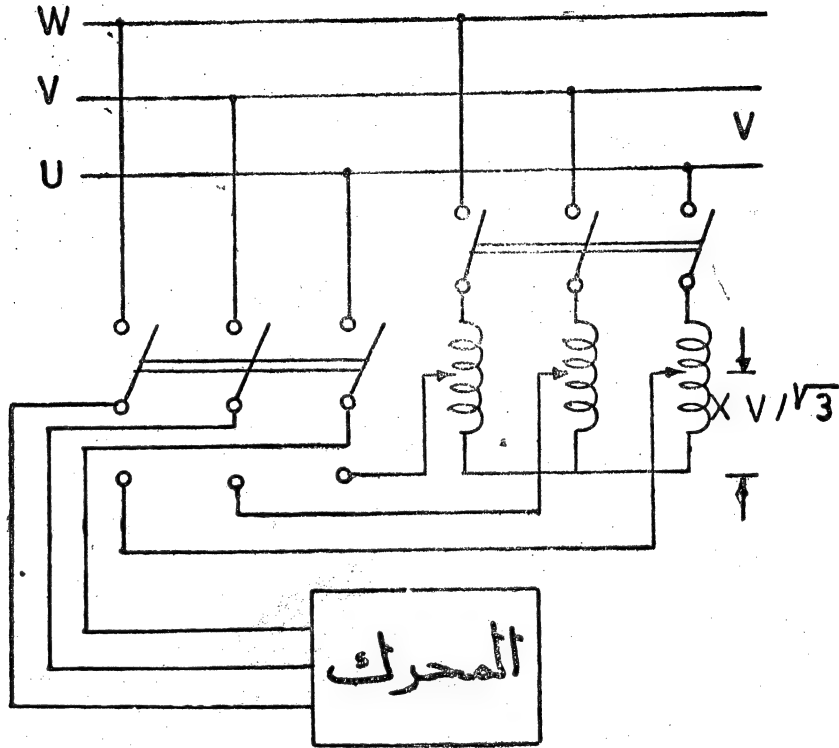
$$\frac{I_{sa}}{I_{sc}} = x^2 \quad (٢-١٦)$$

وهذا يعنى خفض قيمة التيار فى الخط عند البدء بمقدار يساوى مربع نسبة الخفض ، التى يمارسها المحول الذاتى بالنسبة للضغط الذى ينقله من اليزبوع إلى ملفات المحرك ، وهى ما يساوى x^2 فى هذه الحالة . كذلك نجد أن عزم دوران البدء T_{sa} ، باستخدام المحول الذاتى ، ينخفض بنسبة x^2 من قيمة عزم دوران البدء عند التوصيل المباشر T_{sc} حيث نجد أن :

$$\frac{T_{sa}}{T_{sc}} = \left(\frac{I_{sm}}{I_{sc}} \right)^2 = x^2 \quad (٢-١٧)$$

يتضح لنا ، بعقد المقارنة بين ما حصلنا عليه من نتائج فى حالتى البدء باستخدام مفتاح نجمة دلنا ، واستخدام المحول الذاتى ، أن الطريقة الأولى ، ما هى إلا حالة خاصة مكافئة من الطريقة الثانية ، تكون فيها نسبة الخفض فى الضغط x . ويلاحظ بالرجوع الى شكل (٢-٥) أن المحرك يوصل عند استخدام المحول الذاتى أيضاً الى مفتاح ذى ناحيتين ، حيث يتم وضعه خلال فترة البدء على الناحية الموصل عليها المحول الذاتى ، وعندما تعلق السرعة الى

أقصى مدى لها يحول المفتاح الى الناحية الأخرى ، حيث يصبح المحرك موصلاً
توصيلاً مباشراً على الشبكات.



شكل (٥-٢)

مثال :

A squirrel cage induction motor, when started with a star/delta switch, is found to take a starting current of 1.7 times full load line current and give a starting torque of 35 % of full load torque. Find : (a) the full load slip of this motor; (b) the ratio starting to full load current, and the ratio

starting to full load torque, when the motor is started with an autotransformer having a ratio of 0.6.

في حالة استخدام مفتاح نجمة / دلنا وبتطبيق المعادلة (١ - ٢)
نجد أن :

$$(a) \frac{T_s}{T_{FL}} = \left(\frac{I_{phs}}{I_{phFL}} \right)^2 S_n = \left(\frac{\sqrt{3} I_{phs}}{I_{LFL}} \right)^2 S_n$$

$$\therefore 0.35 = (\sqrt{3} \times 1.7)^2 S_n$$

$$\therefore S_n = \frac{0.35}{3 \times 2.89} = 0.0405 = 4.05\%$$

$$(b) \frac{I_{Ld}}{I_{LS}} = 3, \quad \frac{I_{LS}}{I_{LFL}} = 1.7$$

$$\therefore \frac{I_{Ld}}{I_{LFL}} = 1.7 \times 3 = 5.1$$

وهذه هي نسبة تيار البدء إلى تيار الحمل الكامل I_{LFL} (في الخط) عند استخدام طريقة التوصيل المباشر على اليزبوع، دون أى تغيير في توصيلات المحرك. ويكون تيار البدء I_{Ld} في هذه الحالة هو نفسه تيار القصر للمحرك I_{sc} ، كما سبق أن تكررت الإشارة إليه.

عند استخدام المحول الذاتي تكون قيمة x ، كما هي معطاة، تساوي 0.6
وعند تطبيق المعادلات (١٤ - ٢)، (١٥ - ٢)، (١٦ - ٢) نجد أن:

$$\frac{I_{sm}}{I_{sc}} = \frac{I_{sm}}{I_{Ld}} = x = 0.6$$

$$\therefore \frac{I_{sm}}{I_{Ld}} \times \frac{I_{Ld}}{I_{LFL}} = 0.6 \times 5.1 = 3.06 = \frac{I_{sm}}{I_{LFL}}$$

وهذا يعنى أن نسبة تيار البدء الداخلى الى المحرك I_{sm} عند استخدام المحول الذاتى بالنسبة المعطاة ، الى تيار الحمل الكامل (الخطى والمرحلى) لأن التوصيل دلتا فى الحالتين (تساوى 3.06 وباستخدام المعادلة (١ - ٢) فى هذه الحالة نجد أن :

$$\frac{T_{st}}{T_{FL}} = \left(\frac{I_{sm}}{I_{LFL}} \right)^2 S_n = (3.06)^2 \times 0.0405 = 0.379$$

(3) A 3-phase, delta connected squirrel cage motor, is fed from a 400 V supply through a long cable. It is found that the motor develops the same starting torque in star and delta connections. A short circuit test in delta connection gave the following results:

$$220 \text{ V} , \quad 125 \text{ A} , \quad \cos \phi_{sc} = 0.4$$

Find the resistance of the cable and starting currents in star and delta connections.

نحصل من نتائج تجربة دائرة القصر المعطاة على المعلومات الآتية :

$$Z_m = \frac{220 \times \sqrt{3}}{125} = 3.04 \text{ ohms}$$

$$R_m = Z_m \cos \phi_{sc} = 3.04 \times 0.4 = 1.216 \text{ ohm}$$

$$X_m = Z_m \sin \phi_{sc} = 3.04 \times 0.915 = 2.78 \text{ ohms}$$

نظراً لوجود الكابل بين الينوع والمحرك ، فان مقاومته R تدخل فى جميع الحسابات مضافة الى مقاومة المحرك المكافئة R_{teq} فى حالة التوصيل نجمة ، كما هو مبين فى شكل (٦ - ١) . ولكى يمكننا عمل الحساب بنفس الطريقة

في حالة التوصيل دلتا ، فاننا نحول معاوقات المحول Z_m الى تلك التي تكافئها Z_{meq} ، وتكون موصلة نجمة ، كما هو مبين في شكل (٦ - ٢ ب)

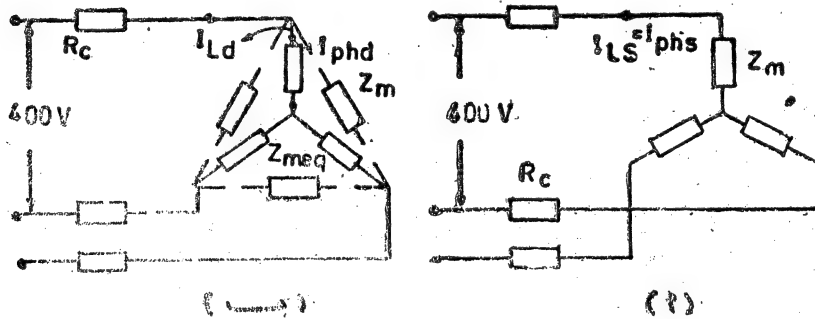
$$Z_{meq} = \frac{Z_m \times Z_m}{3 Z_m} = \frac{1}{3} Z_m = \frac{1}{3} (1.216 + j 2.78)$$

$$R_{meq} = 0.405 \text{ ohm} , \quad X_{meq} = 0.927 \text{ ohm}$$

لكي نحصل على نفس عزم دوران البدء في المحرك ، كما هو مشروط في المسألة ، يجب أن يكون التيار المرحلي في ملفات المحرك متساويا في الحالتين .

$$I_{phd} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{Ld} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{400 / \sqrt{3}}{\sqrt{(R + 0.405)^2 + (0.927)^2}}$$

$$I_{phs} = I_{LS} = \frac{400 / \sqrt{3}}{\sqrt{(R + 1.26)^2 + (2.76)^2}}$$



شكل (٦ - ٢)

$$\therefore 3 \left[(R + 0.405)^2 + (0.927)^2 \right] = \left[(R + 1.216)^2 + (2.78)^2 \right]$$

$$\therefore R^2 = 3.074, \quad R = 1.7052$$

$$I_{Ls} = I_{phs} = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{(2.968)^2 + (2.78)^2}} = 56.9 \text{ A}$$

$$I_{Ld} = \sqrt{3} I_{phd} = \frac{400 \sqrt{3}}{\sqrt{(2.159)^2 + (0.927)^2}} = 98.6 \text{ A}$$

$$\text{Check : } I_{phd} = \frac{98.6}{\sqrt{3}} = 56.9 = I_{phs}$$

(4) a Squirrel Cage motor has a rated Slip of 3% and a Starting current of 5 times the rated current. Calculate in terms of the rated values the starting current and approximately the starting torque :

a) For directly switching on.

b) For star-delta starting.

c) For starting by means of starting choke with a starting Current 3 times rated current.

d) For starting by means of an auto-transformer with a starting current of 3 times rated current.

$$\frac{T_{st}}{T_{fl}} = \left(\frac{I_{st}}{I_{fl}} \right)^2 \times S_n, \quad S_n = 0.03$$

$$a) \frac{I_{st}}{I_{fl}} = 5, \quad \frac{T_{st}}{T_{fl}} = (5)^2 \times 0.03 = 0.75 = 75\%$$

$$b) I_{sc} = I_{Ld}, \quad I_{st} = I_{LS} = I_{phs}, \quad I_{phd} = \sqrt{\frac{1}{3}} I_{sc}$$

$$\sqrt{\frac{1}{3}} \frac{I_{sc}}{I_{fl}} = 5, \quad \frac{I_{phd}}{I_{fl}} = 5, \quad \frac{I_{phd}}{I_{phs}} = \sqrt{3}$$

$$\therefore \frac{I_{phs}}{I_{fl}} = \sqrt{\frac{5}{3}}$$

$$\begin{aligned} \frac{T_{st}}{T_{fl}} &= \left(\frac{I_{phs}}{I_{fl}} \right)^2 \times S_n = \left(\sqrt{\frac{5}{3}} \right)^2 \times 0.03 \\ &= 0.25 = 25\% \end{aligned}$$

$$(c) \frac{I_{st}}{I_{fl}} = 3, \quad \frac{T_{st}}{T_{fl}} = (3)^2 \times 0.03 = 0.27 = 27\%$$

$$(d) \frac{I_{sa}}{I_{Ld}} = \frac{3 I_{fl}}{5 I_{fl}} = \frac{3}{5} = x^2 \quad (I_{Ld} = I_{sc} = 5 I_{fl})$$

$$\therefore x = \sqrt{\frac{3}{5}}$$

$$\begin{aligned} \frac{T_{st}}{T_{fl}} &= \frac{T_{st}}{T_{sc}} \cdot \frac{T_{sc}}{T_{fl}} = x^2 \times 0.75 = \frac{3}{5} \times 0.75 \\ &= 0.45 = 45\% \end{aligned}$$

ثانيا - طرق التحكم في السرعة وتغيير معامل القدرة للمحرك

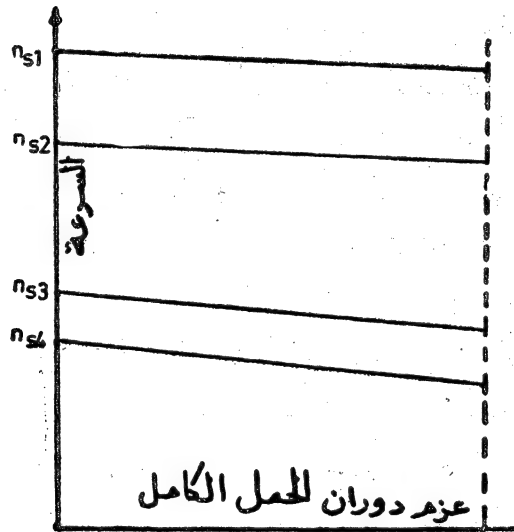
Methods of speed control and power- factor variation of the motor

(٥ - ٢) سرعة المحرك :

يوصف المحرك التأثيرى ثلاثى المراحل بأنه من الناحية الموضوعية يمتلك سرعة ثابتة تقريبا (The motor has Substantially Constant speed) ، فسرعة المحرك فى حالة اللاحمل تختلف اختلافا طفيفا عن سرعة التزامن ، كما سبق أن رأينا فى البنود السابقة ، ثم إنها لا تتغير إلا بمقدار طفيف آخر عن هذه السرعة عندما يصبح المحرك محملا بالحمل الكامل . وبناء على هذه التغييرات الطفيفة فى سرعة المحرك ، فيما بين حالتى اللاحمل والحمل الكامل ، يقال للمحرك إنه يمتلك خاصية التوازى ، (Shunt characteristic) ، كما تبين لنا فى خلال الشرح المتعلق بشكل (٤ - ١) . وقد أوضحنا فى هذا الشرح أن هذا الانخفاض الطفيف فى سرعة المحرك ، بين حالتى اللاحمل والحمل الكامل ، هو الذى يؤدى إلى اعطاء صفة الاتزان لتشغيل المحرك فى هذه المنطقة . ومن الناحية العملية ، فإنه يمكن اعتبار أن المحرك ذو سرعة ثابتة خلال فترة تشغيله ، مع تغير الحمل ، وهى عبارة عن سرعة التزامن على وجه التقريب . وفى معظم التطبيقات العملية ، التى يستخدم فيها المحرك ، لا يؤدى هذا الفرض إلى خلق صعوبات أو تعقيدات تتصل بكنه الحمل أو الحسابات الخاصة به ، بل إنه يتمشى معها ويسهلها ، ولا يكاد يؤثر على درجة الدقة المطلوبة .

نحتاج فى كثير من التطبيقات العملية للمحرك إلى تغيير السرعة فى نطاق معين ، تختلف حدوده على حسب نوع التطبيق . وهذا يعنى أن السرعة عند اللاحمل تتغير بدرجة ملحوظة عن سرعة التزامن ، وكأنا تغيرت سرعة التزامن للمحرك فأصبحت هى السرعة الجديدة تقريبا . ثم إذا قمنا بتحميل المحرك فى

حاليته الجديدة ، فإن سرعته تتغير تغيرا طفيفا ما بين حالتي اللاحمل والمحمل الكامل ، على نفس المنوال كما كان يحدث في حالته الأصلية ، لأن هذا السلوك رهن بخصائص المحرك الأساسية التي لم تتناولها يد التعديل . بين شكل (٧ - ٢) منحنيات خواص عزم الدوران المختلفة مع السرعة ، عند تغيير سرعة المحرك الأصلية باستخدام بعض الوسائل الدخيلة ، ويتضح منها ظهور خاصية التوازي للمحرك في جميع الحالات ، مهما تغيرت سرعة اللاحمل ، التي يمكن أن نعتبرها أصبحت مناظرة لسرعات تزامن جديدة هي n_{s2} ، n_{s3} ، n_{s4} ، كما هو مبين بالرسم .



(شكل ٧ - ٢)

(٢-٦) معامل قدرة المحرك :

يتضح لنا بمراجعة مخطط الدائرة للمحرك التأثيرى ثلاثى المراحل أن التيار الذى يسحبه المحرك من الينبوع ، في حالة اللاحمل ، هو تيار حتى

متأخر بزاوية كبيرة على ضغط الينبوع . ويتكون هذا التيار من مركبتين ، مركبة صغيرة متفقة مع حليامع الضغط، وهي التي تجعل المحرك يزود نتيجة لسريانها فيه بالمفقودات الميكانيكية ومفقودات الحديد ، ثم مركبة اكبر كثيرا من المركبة الأولى ، وهي التي تزود المحرك بالمجالى المغناطيسى اللازم لتشغيله .

وقد تم استعراض النظريات الأساسية للمحرك على أساس بقاء هاتين المركبتين ثابتتي القيمة والزاوية المرحلية، في أثناء تغير الحمل على المحرك (قد يطرأ عليها تغير طفيف لا يؤثر اعماله تأثيرا هاما على دقه هذه النظريات) . وهذا يعنى وجود مركبة دائمة ، ذات طبيعة حثية ، في التيار الذى يسحبه المحرك من الينبوع ، علاوة على أن المركبة الأخرى ، التى تسرى فى المحرك بسبب وجود الحمل، هى الأخرى ذات طبيعة حثية ، نتيجة لطبيعة دائرة العضو الدائرة الحثية التكوين بالضرورة . ويكون نتيجة هذا كله أن التيار الابتدائى ، الذى يسحبه المحرك من الينبوع مع أية درجة للحمل، لابد وأن يكون تيارا حثيا متأخرا على الضغط بزاوية ملحوظة . نجد على هذا الاساس أن من عيوب المحرك التأثيرى البارزة صغر معامل قدرته المتأخر بالنسبة لمعامل قدرة المحرك المتزامن ، الذى يمكن التحكم فيه تحكما مطلقا بتغيير تيار التنبيه ، كما سبق شرحه بالتفصيل في كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربائية . ويقال إن من عيوب المحرك التأثيرى أنه يمتلك معامل قدرة فقيرا (it has a poor power factor) . لذلك نتلمس الوسائل التى يمكن عن طريق استخدامها رفع قيمة معامل القدرة للتيار الحثي ، الذى يسحبه المحرك من الينبوع ، ويطلق عليها لقب وسائل تحسين معامل القدرة ، أو وسائل تصحيح معامل القدرة للمحرك

(Methods of power-factor improvement or correction)

وهناك وسائل تستخدم لتحسين معامل القدرة فقط ، كما أن هناك وسائل يقترن فيها تحسين معامل القدرة بتغيير السرعة ، كما سبق أن ذكرنا في مطلع هذا الكلام . والحقيقة الهامة ، التى يجب ذكرها في هذا المضمار ، أن

تطوير إمكانيات تشغيل المحرك التأثري ، باستخدام مثل هذه الوسائل ، قد جعل منه محركاً يفي بمعظم الاحتياجات في التطبيقات العملية التي تستخدم فيها المحركات الكهربائية ، مما هيأ له فرصة الشيوع في كل المجالات .

(٧-٢) الطرق الخاصة بتغيير سرعة المحرك فقط :

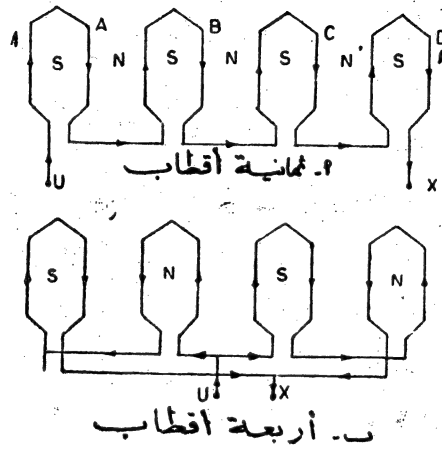
توجد طريقة واحدة خاصة بتغيير سرعة المحرك فقط ، لا يظهر فيها التغيير في معامل القدرة بصورة ملموسة . وتقوم هذه الطريقة على أساس تغيير عدد أقطاب المحرك ، مع ثبوت قيمة تردد الينبوع ، مما يؤدي إلى تغيير قيمة سرعة التزامن للمحرك ، وبالتالي سرعة دوران العضو الدائر ، التي تتغير تغيراً طفيفاً جداً عنها ، ما بين حالي اللاحل والحل الكامل . ويمكن بطبيعة الحال الوصول إلى نفس النتيجة عن طريق تغيير تردد الينبوع مع الاحتفاظ بعدد أقطاب المحرك ثابتاً . ونظراً لأننا نقوم بدراسة المحرك التأثري نفسه ، ونبحث عما يمكن أن يؤثر على خصائصه من تغييرات ، نتيجة لما يطرأ على تكوينه من تعديلات ، فإن الحالة الثانية لا تهمنا بقدر ما تهمنا الحالة الأولى ، التي يغلب استخدامها في حالة المحرك ذي القفص السنجابي ، نظراً لأن القفص السنجابي يمكن أن يتواءم مع المجال المغناطيسي مهما اختلف عدد أقطابه .

ونظراً لأن عدد الأقطاب للمحرك هو الذي يتحكم في كيفية ترتيب ملفات العضو الثابت في المجارى وتقسيمها الى مراحل ، كما سبق بيانه في باب ملفات المنتج في آلات التيار المتردد من كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربائية ، فإن تغيير عدد الأقطاب في المحرك ، اللازم للتحكم في سرعته ، يستوجب إعادة ترتيب هذه الملفات على النحو الذي يؤدي الى الحصول على عدد الأقطاب المناظرة للسرعة الجديدة . وهناك طريقتان للوصول الى الغرض المطلوب في الحياة العملية ، تم احداها بتزويد العضو الثابت للمحرك بمجموعات من الملفات مستقلة عن بعضها البعض تمام الاستقلال ، بحيث تكون كل

مجموعة خاصة بسرعة معينة ، وتوصل الى الزنبوع عند ادارة المحرك على هذه السرعة ، وتتم الثمانية بجعل الملفات ذات تقسيمات مختلفة ، بحيث تتصل مع بعضها البعض على الزنبوع بتوصيلات معينة ، باستخدام مفتاح مخصوص ، لإعطاء عدد الأقطاب المناظرة للسرعة المطلوبة . وتتصل المشاكل التي تتعلق بتنفيذ احدى هاتين الطريقتين اتصالاً وثيقاً بتكوين المحرك أساساً ، وتصميم ملفاته وترتيب المفتاح الخاص بتغيير السرعة ، وليس المجال هنا للتعرض لهذه المشاكل وطرق تزييلها . ويكفي أن نشير هنا الى أن عدد السرعات التي يمكن أن نحصل عليها من المحرك في هذه الحالة يكون قاصراً في الغالب على سرعتين ، وقد يصل الى ثلاث سرعات على أكثر تقدير ، حيث يصبح مفتاح السرعات ذا تعقيد كبير ، كما قد يكون من المفيد أن نشرح بعض المبادئ التي تتخذ أساساً لعمل التغييرات في توصيل الملفات لتعديل السرعة .

يبين شكل (٨ - ٢) مجموعة من الملفات (خاصة بمرحلة واحدة من المراحل الثلاث) يكون سريان التيار فيها بحيث يتكون حولها مجال مغناطيسي ذو ثمانية أقطاب (بلغة طرق عمل الملفات يقال ان هذه الملفات مصممة لثمانية أقطاب) . نلاحظ أن الملفات تكون في هذه الحالة موصلة على التوالي بحيث يمر التيار فيها جميعاً في نفس الاتجاه ويدخل عند بداية الملف A ويخرج من نهاية الملف D .

يتبين من شكل (٨ - ٢) ب أنه عند تقسيم الملفات إلى مجموعتين ، في كل مجموعة ملفان متصلان معاً على التوالي ، ثم توصيل المجموعتين معاً على التوازي إلى الزنبوع ، بحيث ينعكس اتجاه مرور التيار في الملفين B , D ، عما كان عليه في شكل (٨ - ٢) أ ، ويظل كما كان في الملفين الآخرين ، فان عدد أقطاب المجال المغناطيسي حول الملفات يصبح أربعة في هذه الحالة بدلا من ثمانية . وهكذا نجد أن تغيير اتجاه مرور التيار في نصف عدد الملفات ، بمجرد تغيير ترتيب التوصيلات إلى الملفات مع الزنبوع ، قد هبط بعدد الأقطاب الى



شكل (٨ - ٢)

النصف . وهذه طريقة مبسطة لبيان كيفية مضاعفة (السرعة أو تقليلها الى النصف) عن طريق تغيير توصيلات الملفات . ويتم هذا التغيير باستخدام مفاتيح جاهزة لهذا الغرض تزودها المحركات . ويطلق على هذا الأسلوب في تغيير التوصيلات اسم توصيلات دالندر (Dahlander connection) . هذا وتحتفظ الآلة في كلتا حالتى التوصيل بنفس عدد الخطوط المغناطيسية فى المجال المغناطيسي لكل قطب على وجه التقريب .

تزود المحركات التى تدير آلات الورش ، التى تحتاج الى سرعات متغيرة ، بمجموعتين من الملفات ، بحيث يمكن أن تعمل احدى المجموعتين بأربعة أقطاب أو ثمانية ، وتعمل المجموعة الأخرى بستة أقطاب أو اثنا عشر قطباً ، وبذلك يمكن الحصول على السرعات ١٥٠٠ ، ١٠٠٠ ، ٧٥٠ ، ٥٠٠ لفة فى الدقيقة ، عندما يتغذى المحرك من يذبوع تردده ٥٠ ذبذبة/ ثانية .

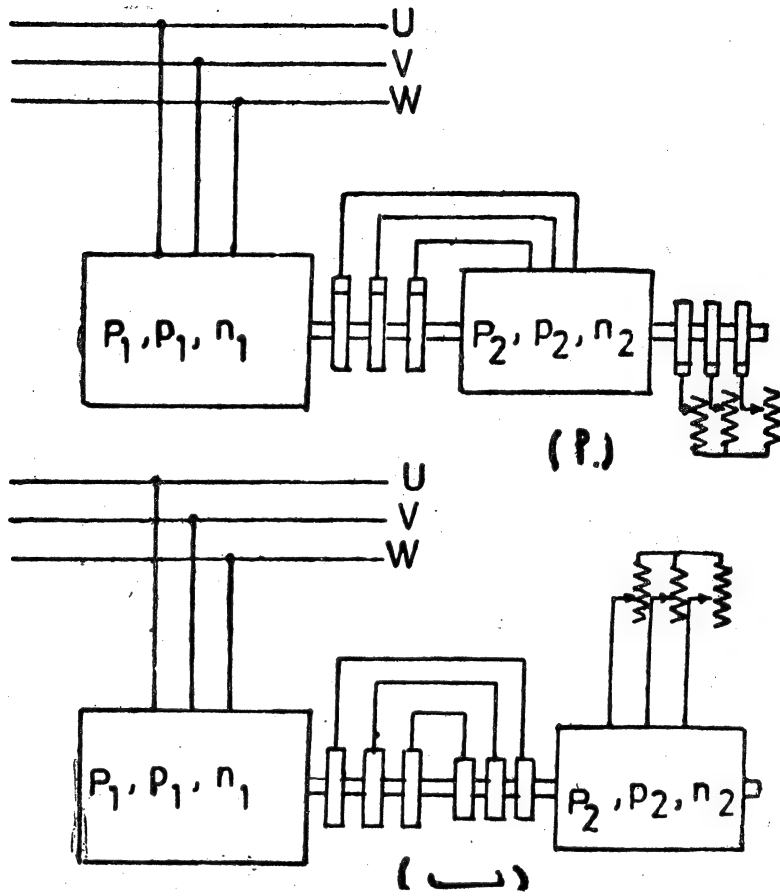
هذا وتجدر الإشارة الى أنه فى حالة تغيير سرعة المحرك بتغيير عدد

الأقطاب بالنسبة لملفات العضو الثابت ، فانه في حالة المحركات ذات القفص السنجاني يتواءم القفص السنجاني تلقائياً مع هذا التغير ، أما في حالة المحركات ذات الحلقات الانزلاقية يلزم من البديهي تغيير توصيلات ملفات العضو الدائر للحصول على تغيير في عدد أقطابها مناظر للتغيير الذي حدث في عدد أقطاب ملفات العضو الثابت . لذلك نجد أن هذه الطريقة في تغيير السرعة تستخدم عموماً مع المحركات ذات القفص السنجاني فقط ، كما سبقت الإشارة إليه . ومن عيوب هذه الطريقة أن تغيير السرعة يتم على درجات متفاوتة تفاوتاً كبيراً (نصف السرعة أو ضعفها مثلاً) ، كما أن معامل القدرة يكون عادة منخفضاً في مثل هذه المحركات ، علاوة على التوصيلات الكثيرة ، والتي لا تسلم من التعقيد ، التي يزود بها العضو الثابت .

توجد طريقة أخرى لتغيير السرعة عن طريق تغيير عدد الأقطاب يستخدم فيها محركان يختلف عدد الأقطاب في أحدهما $2p_1$ عن عدد الأقطاب في الآخر $2p_2$ وبحيث يكون p_1 لا يساوي p_2 وتكون قدرة المحرك الأول P_1 وقدرة المحرك الثاني P_2 .

ومن البديهي أنه بتشغيل المحرك الأول نحصل على السرعة $n_1 = \frac{60f}{p_1}$ وتشغيل المحرك الثاني نحصل على سرعة أخرى $n_2 = \frac{60f}{p_2}$ ، وذلك بالتوصيل على نفس الذبوع ذي التردد f . وتكون n_1 قريبة جداً من سرعة الترامن $n_{s1} = \frac{60f}{p_1}$ ، كما تكون n_2 قريبة جداً من سرعة الترامن $n_{s2} = \frac{60f}{p_2}$

هذا ويمكن عن طريق توصيل المحركين بالتتابع (cascade connection) ، كما هو مبين في شكل (٩ - ٢) يمكن الحصول على سرعتين أخريين ، كما يتضح من الآتي :



شكل (٩ - ٢)

إذا فرضنا أن f_s هو التردد في ملفات العضو الدائر للمحرك الأول ،
وهو بالتالي تردد اليذبوع الذي يغذى الملفات الابتدائية (ملفات العضو الثابت
في أ وملفات العضو الدائر في ب) المحرك الثاني ، وأن عمود الإدارة
للمحركين معا يدور بالسرعة n نجد أن:

$$f_s = \frac{n_{s1} - n}{n_{s1}} f = \frac{(n_{s1} - n) p_1 n_{s1}}{n_{s1} 60} = \frac{p_1 (n_{s1} - n)}{60}$$

تكون n ، سرعة عمود الإدارة المشترك بين المحركين ، قريبة القيمة جداً من n_{2s} مما يعنى أن.

$$n \approx n_{2s} \approx \frac{60}{P_2} \quad sf = \frac{(n_{s1} - n) P_1}{P_2}$$

$$\therefore n \approx \frac{P_1}{P_1 + P_2} n_{s1} \quad (٢-٢١)$$

ويكون حصـولنا على السرعة المعطاة بالمعادلة (٢-٢١) على أساس توصيل الأطراف التي تغذى الملفات الابتدائية للمحرك الثانى مع الملفات الثانوية للمحرك الأول ، بحيث يكون عزم الدوران الناشئ عن المحرك الثانى على عمود الإدارة المشترك فى اتجاه عزم دوران المحرك الأول ، مما يعنى تأزر عزمى دورانها معاً وإعطاء مجموع قدرتيهما على عمود الإدارة عند سرعة الدوران المشتركة. فإذا كان توصيل الأطراف المذكورة بحيث يكون عزمى دوران المحركين فى اتجاهين متضادين (يمكن حدوث ذلك بمجرد تبديل طرفين من أطراف التوصيل الثلاثة) فأننا نحصل على فرق القدرتين على عمود الإدارة عند سرعة الدوران المشتركة ، ويستوجب الأمر فى هذه الحالة إعطاء n_{s2} فى العلاقة السابقة إشارة سالبة (نظراً لدوران المجال المجال المغناطيسى للمحرك الثانى فى عكس الاتجاه السابق). وتكون السرعة المشتركة فى هذه الحالة عبارة عن :

$$n \approx n_{s1} \frac{P_1}{P_1 - P_2} \quad (٢-٢٢)$$

ويمكن أن نستدل من طبيعة تركيب المعادلة (٢-٢٢) على سبب اشتراطنا فى بادئ الأمر أن يكون P_1 لا يساوى P_2 .

بناء على ماسبق شرحه يمكن تلخيص الامكانيات الخاصة بالقدرة والسرعة على عمود الادارة ، في حالة وجود محركين بالمواصفات السابقة ، على النحو الآتي :

| الامكانيات | القدرة على عمود الادارة | سرعة عمود الادارة المشترك |
|---|-------------------------|------------------------------------|
| استخدام المحرك الأول بمفرده | P_1 | $n = n_{s1} = \frac{60f}{P_1}$ |
| استخدام المحرك الثاني بمفرده | P_2 | $n = n_{s2} = \frac{60f}{P_2}$ |
| توصيل المحركين بالتتالي بعزمي دوران في نفس الاتجاه على عمود الادارة المشترك | $P_1 + P_2$ | $n = n_{s1} \frac{P_1}{P_1 + P_2}$ |
| توصيل المحركين بالتتالي بعزمي دوران متضادي الاتجاه على عمود الادارة المشترك | $P_1 + P_2$ | $n = n_{s1} \frac{P_1}{P_1 - P_2}$ |

ويتضح من الجدول السابق أن قدرة المحرك الأول P_1 تكون أكبر من قدرة المحرك الثاني P_2 ، حيث أن طبيعة التوصيل بالتتالي تحتم أن تكون تغذية المحرك الثاني بالقدرة الانزلاقية (Slip power) ، الناشئة في الملفات الثانوية للمحرك الأول . ويلاحظ أن التوصيل بالطريقة المبينة في شكل (٩ - ٢) ب يمتاز عن الطريقة المبينة في شكل (٩ - ٢) أ بأنه يجعلنا نستغني عن الفرش على الحلقات الانزلاقية في المحركين ، حيث يكون التوصيل مباشرا بينها لأنها تدور معا ، وهذا يعمل أيضا على توفير مفقودات الاحتكاك ، ومفقودات التلامس الكهربية ، الناشئة عن وجود هذه الفرش . هذا ونحب أن نشير إلى أن معامل القدرة يكون منخفضا عند استخدام هذه الطريقة في تغيير السرعة .

٢ - تغيير السرعة ، مع التأثير على معامل القدرة ، باستخدام مقاومات

في الملفات الثانوية :

من البديهي أن هذه الطريقة لا تستخدم إلا مع المحركات ذات الحلقات الانزلاقية ، حيث يمكن توصيل مقاومة متغيرة ، ثلاثية المراحل ، مع ملفات العضو الدائر عن طريق الفرش . وبتغيير هذه المقاومة يمكن الحصول على سرعات متغيرة من المحرك . ومما لاشك فيه أن إضافة المقاومة إلى دائرة الملفات الثانوية ذات الطبيعة الحثية يعمل على تحسين معامل القدرة ، ولكننا لانتفت إلى ذلك بقدر اهتمامنا بتغيير السرعة . ويمكن أن نجمل شرح ما يحدث في هذه الحالة على النحو الآتي : إن وجود المقاومة الزائدة في ملفات العضو الدائر يعمل على زيادة مفقودات النحاس الثانوية $P_{cu2} = sP_{12}$. ونظرا لأن ذلك لا علاقة له بقدرة المدخل إلى المحرك P_1 ، وبافتراض ثبوت قيمة P_{12} تقريبا على هذا الأساس ($P_1 \approx P_{12}$) فإن تغيير قيمة P_{cu2} يؤدي إلى تغيير قيمة S ، أى إلى تغيير سرعة المحرك . وهذا يعنى أننا نستطيع خفض سرعة المحرك فقط عن طريق تبديد جزء زائد من قدرة المخرج ، التي تقل بنفس نسبة انخفاض السرعة ، مما يعمل على حفظ عزم الدوران ثابت القيمة على وجه التقريب ، وهوما يتمشى مع افتراض ثبوت قيمة $(P_{12} = T\omega_s)$ ، ويكون خفض السرعة في هذه الحالة على حساب معامل الجودة للمحرك $(\frac{P_2}{P_1})$ ، وهو غير مستحب على الإطلاق ، علاوة على المشاكل التي يمكن أن تنشأ عن تبديد كميات كبيرة من القدرة في المقاومة الخارجية . لذلك فإن هذه الطريقة تستخدم في أضيق الحدود ، عندما يراد تغيير سرعة المحرك بما لا يتجاوز حوالى ١٥٪ .

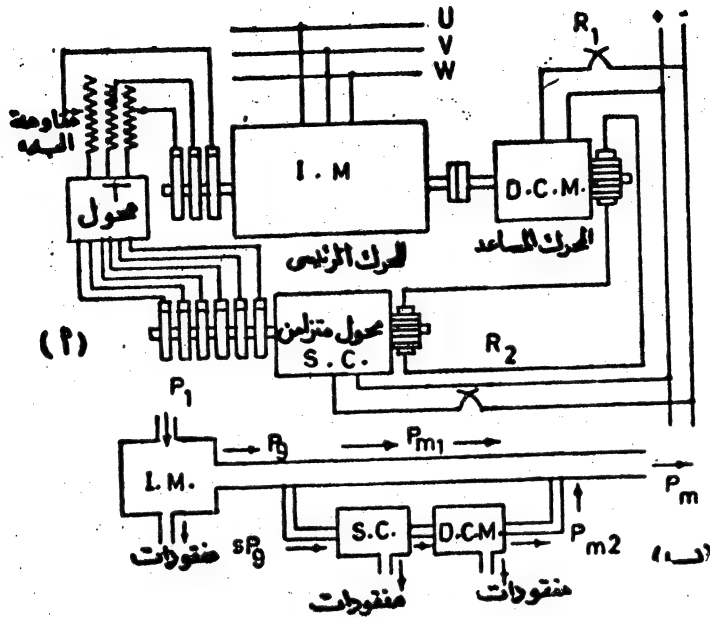
٣ - تغيير السرعة ومعامل القدرة باستخدام المحرك التأثري مع مجموعة من الآلات :

يلينا في البند السابق كيف يكون تغيير السرعة في المحرك ناشئا أساسا عن تغيير في قيمة المفقودات النحاسية الكلية P_{cu2} في دائرة الملفات الثانوية للمحرك ،

بحيث يمكن تبديد الجزء الزائد ، الناشئ عن خفض السرعة ، في مقاومة خارجية توصل على التوالى مع هذه الملفات . وقد يترأى لنا أنه بدلا من تبديد هذه القدرة الزائدة في مقاومة خارجية ، أن نقوم باستغلالها في عمل نافع ، كادارة محرك مساعد auxiliary motor يشترك مع المحرك التأثيرى الرئيسى (main motor) على عمود إدارة واحد ، أو إعادة هذه القدرة بغذية رجعية (feed back) للينبوع الذى يغذى المحرك . ونظرا لأن هذه القدرة تؤخذ من ملفات العضو الدار عند سرعات مختلفة ، فإن ترددها يكون متغيرا على حسب تغير سرعة المحرك ، مما يستلزم عمل ترتيبات معينة للاستفادة بها على عمود الادارة أو قبل تغذيتها رجعيا إلى الينبوع ذى التردد ثابت القيمة f . وتختلف الترتيبات اللازمة في كل من الحالتين بطبيعة الحال ونوجز فيما يلي شرح طريقة شائعة لكل حالة .

١ - توصيل كرامر المتتالى : (Kramer Cascade Connection)

يبين شكل (١٠ - ٢) كيفية توصيل المحرك التأثيرى ، ويطلق عليه اسم المحرك الأساسى ، في مجموعة من الآلات (machine set) تتكون ، علاوة على ذلك ، من محرك تيار مستمر ، ويطلق عليه اسم المحرك المساعد ، يشترك مع المحرك التأثيرى على نفس عمود الادارة ، ثم من محول دوار أو مترامن (Synchronous or rotary converter) يعمل على تحويل قدرة التيار المتردد ، التى تأتى إليه من الملفات الثانوية للمحرك التأثيرى نتيجة تغيير السرعة ، إلى قدرة تيار مستمر يغذى بها محرك التيار المستمر . فإذا أهملنا المتقودات ، فى كل من المحول المترامن ، ومحرك التيار المستمر ، فإن هذا يعنى أن القدرة التى تطردها الملفات الثانوية إلى خارجها ، نتيجة خفض سرعة المحرك ، والتى كان يمكن أن تبدد في المقاومة الخارجية ، لو وجدت موصلة إلى الفرش بدلا من المحول المترامن ،



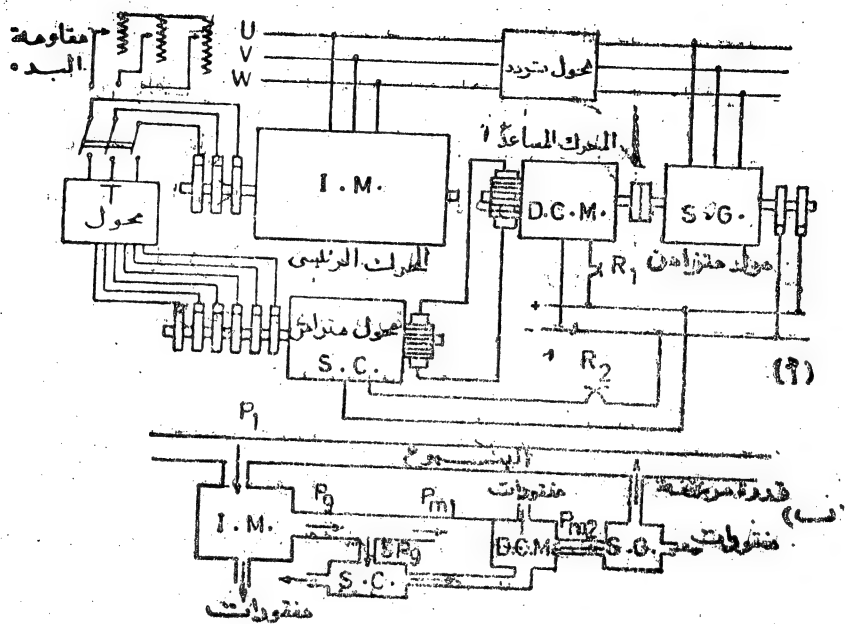
(شكل ١٠ - ٢) أ، ب

تعود مرة أخرى لتؤدي مهمتها على عمود الادارة مع السرعة الجديدة . فاذا افترضنا ، كما سبق في حالة المقاومة ، أن قدرة المدخل P_1 للمحرك التأثري لا تتغير في خلال ذلك ، مما يعنى أن قدرة المدخل للملفات الثانوية لهذا المحرك P_{12} تظل ثابتة تقريبا ، فإن القدرة التي يأخذها عمود الادارة من المحركين معا ، الرئيسى والمساعد ، لا تتغير ، على وجه التقريب ، أيضا . وهذا يؤدي إلى ازدياد عزم الدوران على عمود الادارة بانخفاض السرعة ($P = T\omega$) . لذلك يطلق على توصيلة كرامر هذه اسم الادارة ذات القدرة الثابتة (Constant power drive) . والسؤال الذى يفرض نفسه علينا الآن هو كيف يتم لنا تغيير سرعة المحرك ، أو معامل قدرته . من البديهي أننا يجب أن نفرض على عمود الادارة سرعة معينة (منخفضة فرضا) يلتزم بها المحرك التأثري ، وينتج بناء على وجودها زيادة القدرة في الملفات الثانوية ، بحيث

يسرى الجزء الزائد من خلال المحول المتزامن إلى المحرك المساعد لكي يعطيه مرة أخرى على عمود الإدارة . ويتم ذلك عن طريق تغيير سرعة المحرك المساعد بتغيير المقاومة R_1 في ملفات مجاله . ونظرا لأن المحول المتزامن هو في الواقع محرك متزامن ، من ناحية حلقاته الانزلاقية ، (سوف يأتي شرحه بالتفصيل في باب تحويل الطاقة الكهربائية) فإن تغيير معامل قدرته ، عن طريق تغيير تيار التنبيه الخاص به بواسطة المقاومة R_2 ، يؤدي إلى تغيير معامل القدرة في الملفات الثانوية للمحرك التأثيري ، وبالتالي للتيار الذي يستجبه من الينبوع . وبين شكل (١٠ - ٢) ب كيف تسرى القدرة من الينبوع حتى تصل إلى عمود الإدارة بقيمة ثابتة تقريبا . وتتميز هذه الطريقة بزيادة عزم الدوران عند انخفاض السرعة ، مع ثبوت قيمة قدرة المخرج على عمود الإدارة ، لذلك يحسن استخدامها في صناعة الحديد لإدارة درافيل السحب (Rolling mills)

ب - توصيل شيربيوس المتتالي : (Scherbius cascade connection)

في هذه الحالة لا تعود القدرة الزائدة في الملفات الثانوية للمحرك التأثيري الرئيسي ، الناشئة عن خفض السرعة ، إلى عمود الإدارة بواسطة محرك التيار المستمر المساعد ، وإنما تغذى رجعيا إلى الينبوع (fed back to the supply) باستخدام مولد تيار متردد ، مع الأجهزة المناسبة ، يدور مع المحرك المساعد على عمود إدارة مشترك ، مستقل عن عمود الإدارة الرئيسي ، كما يتبين من شكل (١١ - ٢) أ . وهذا يعني أن القدرة التي يأخذها الحمل على محور الإدارة الرئيسي تنخفض قيمتها بما يتناسب مع انخفاض قيمة السرعة ، دون أن يؤثر ذلك تأثيرا ملحوظا على معامل جودة المحرك التأثيري ، كما كان يحدث في حالة استخدام المقاومة ، لأن ما ينتقص من القدرة يغذى معظمه رجعيا إلى الينبوع (بعد ضياع ما يساوي المفقودات في الآلات المساعدة فقط) . وتكون نتيجة ذلك أن يظل عزم الدوران المبذول



شكل (١١-٢) أ، ب

من المحرك ثابت القيمة تقريبا $\left(\frac{P_2}{\omega}\right)$ ، لذلك يطلق على هذا التوصيل اسم الادارة ذات عزم الدوران الثابت (Constant torque drive) ،
 ويستخدم عندما يحتاج الحمل إلى عزم دوران ثابت القيمة عند سرعات متغيرة ،
 بينما يستعمل توصيل كرامر عندما يحتاج الحمل إلى قدرة ثابتة القيمة مع
 سرعات متغيرة . يكون تغيير السرعة في هذه الحالة أيضا عن طريق تغيير
 قيمة المقاومة R_1 الداخلة في ملفات التنبيه للمحرك المساعد ، كما يكون تغيير
 معامل القدرة عن طريق تغيير قيمة R_2 أيضا . يبين شكل (١١-٢) ب
 مسار القدرة الزائدة الناشئة عن خفض السرعة حتى ترتجع إلى الينوع . هذا
 وتجب الإشارة إلى أن طريقة شريوس الأصلية (BBC-Scherbius)

تقوم على أساس الافكار التي يوضحها شكلي (١١ - ٢) ا، ب، ولكن يستخدم فيها محرك توالى ذو مبدل للتيار المتردد . وهذا المحرك يتغذى بالقدرة من الحلقات الانزلاقية للمحرك الرئيسي، ويمكن أن يدور على نفس عمود الادارة للمحرك الرئيسى ، فيرد القدرة التي يأخذها ميكانيكيا على عمود الادارة الرئيسى ، كما يحدث في حالة توصيلة كرامر ، أو أنه في حالة توصيلة شريوس الأصلية يكون عمود ادارته مستقلا عن عمود الادارة الرئيسى ، ولكنه يدير مولدا تأثيريا (Induction generator) ، الذى يغذى القدرة مرتجعة إلى الزنبوع . هذا ونظرا لأن الطالب ليس لديه أية فكرة في الوقت الحاضر عن المحركات ذات المبدلات للتيار المتردد، أو المولد التأثيرى ، فقد حاولنا اعطائه فكرة مبسطة، في حدود معلوماته ، عن طريقة شريوس الرئيسية في تنظيم سرعة المحرك التأثيرى بالقدرة المرتجعة إلى الزنبوع، دون التعرض للأنوع التي لا يعرفها من الآلات.

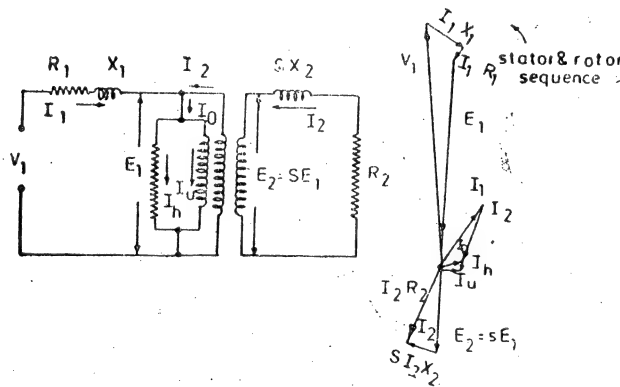
٤ - تغيير السرعة ومعامل القدرة باستخدام ضغط محقون في الملفات الثانوية:

(Speed and power - factor Variation using injected secondary voltage)

لو تمنعنا قليلا فيما يحدث عند تغيير السرعة باستخدام المقاومة الخارجية ، أو باستخدام توصيلتي كرامر وشريوس ، لوجدنا أن الأساس في الأمر كله هو والتغير الناشئ في الضغط المرحلي للملفات الثانوية ($SE_{20} = E_{2s}$) للتغير المطلوب في السرعة أو معامل القدرة . ويؤدى تغير السرعة أساسا إلى تغير في قيمة ($E_{2s} (= SE_{20})$) ، كما أن تغير معامل القدرة يرتبط أساسا بالتغير في زاوية الاختلاف المرحلي للضغط E_{2s} مع التيار الثانوى ، ومن ثم مع التيار الابتدائى ، للمحرك. وهذا يلهمنا فكرة استخدام ضغط مضاد يحقن (injected) على أطراف الملفات الثانوية ويكون تغيير قيمته سببا في تغيير السرعة أساسا ،

كما أن تغيير زاوية اختلافه المرحلي (مع ضغط الينبوع) ، يكون السبب الأساسي في تغيير معامل القدرة للمحرك . والمشكلة الرئيسية ، التي تواجهنا في سبيل الحصول على هذا الضغط ، هي أنه ضغط متغير التردد والزاوية المرحلية ، إذ تتوقف قيمة تردده على قيمة معامل الانزلاق s ($f_{2s} = sf_1$) عند السرعة المطلوبة n ($s = \frac{n_s - n}{n_s}$) ، كما تتوقف زاويته المرحلية على مدى اختلاف معامل القدرة الجديد عن معامل القدرة الأساسي للمحرك .

فاذا فرضنا وجود يذبوع ثلاثى المراحل ، يوصل إلى أطراف الملفات الثانوية عن طريق الفرش ، ويمكن أن يعطينا هذا النوع من التردد ، وهو أمر يمكن ترتيبه (باستخدام محول تردد بين الحلقات الانزلاقية للمحرك والذبوع ، وسوف يرد شرح محرك التردد مع آلات التيار المتردد ذات المعدلات) نستطيع أن نستطرد إلى دراسة الموضوع بطريقة سهلة بتقسيمه إلى جزءين أساسيين ، الجزء الخاص بتغيير السرعة، والجزء الخاص بتغيير معامل القدرة. هذا ونظرا لأن الأفكار الخاصة بذلك الموضوع ، والنتائج المترتبة عليها، ترتبط ارتباطا وثيقا بقيمة الضغط E_{2s} وزاويته المرحلية، في مخطط المتجهات للمحرك، فإن خير ما نبدأ به دراستنا إعادة رسم هذا المخطط ، كما في شكل (١٢-٢) ،



(4)

(1)

شکل (۱۲-۲) اءب

مع دائرة المحرك المكافئة كما في شكل (١٢ - ٢ب) ، مع مراعاة الدقة النهائية بالنسبة لوضع المتجهات ، على حسب كونها ضغوطاً أو هبوطاً في الضغط . وسوف نجد بعض الاختلاف في هذه الحالة عما سبق بيانه في مخطط متجهات المحرك المعطى في الباب الأول ، ولكنه اختلاف من حيث الشكل وله مبرراته . ولتوضيح ذلك نقول ، على سبيل المثال ، ان المتجه IR في المخطط السابق يمثل مركبة الضغط اللازمة لموازنة هبوط الضغط في المقاومة ، ولا يمثل هبوط الضغط نفسه ، لأن اتجاه هذا الأخير يجب أن يكون في عكس اتجاه التيار ، وليس في اتجاه التيار كما هو معطى . كذلك بالنسبة للمتجه IX الذى يجب أن يكون متأخراً عن التيار بزاوية 90° إذا كان يمثل هبوط الضغط الحثي . أما في المخطط الجديد ، المعطى في شكل (١٢ - ٢) ، فسوف نجد أننا نلتزم بوضع كل متجه على حسب أصله ، فلا نضع بدلاً منه مركبة المتجه التي توازنه . ذلك لأننا سوف نحتاج في النهاية إلى تحديد زوايا الاختلاف المرحلي للضغط المحقون بالنسبة لضغط الينبوع بدقة ، وهو الأساس في رفع السرعة أو خفضها ، وتحسن معامل القدرة أو فقره . في مخطط المتجهات المبين في شكل (١٢ - ٢) نجد أن :

V_1 هو الضغط المرحلي الواصل إلى ملفات المحرك التأثيرى الابتدائية ، I_1 التيار الابتدائي المرحلي ، $I_1 X_1$ هبوط الضغط في ممانعة التسرب الابتدائية ، $I_1 R_1$ هبوط الضغط في مقاومة الملفات الابتدائية ، لكل مرحلة ، I_0 تيار اللاحمل الذى يتكون من تيار التنبيه I_h و تيار المققودات I_h ، E_1 هي القوة الدافعة الكهربائية المضادة ، المتولدة في كل مرحلة من الملفات الابتدائية بفعل المجال المغناطيسى الدائر .

E_2 هي القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في كل مرحلة من الملفات الثانوية بفعل المجال المغناطيسى الدائر ($E_2 = sE_1$) وفي نفس اتجاه E_1 لأنها متولدتان

بجعل نفس المجال المغناطيسي وباعتبار أن نسبة عدد اللفات متساوى في الملفات الابتدائية والثانوية ، أو بمعنى آخر أن E_2 منسوبة إلى الملفات الابتدائية (I_2 هو التيار الثانوى منسوباً إلى الملفات الابتدائية ، R_2 مقاومة الملفات الثانوية لكل مرحلة منسوبة إلى الملفات الابتدائية ، X_{22} بممانعة التسرب المرحلية للملفات الثانوية منسوبة إلى الملفات الابتدائية في حالة السكون

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} , (n = 0) \text{ معامل الانزلاق عند السرعة } n \text{ للمحرك ،}$$

باعتبار أن المجال المغناطيسي يدور بسرعة التزامن n_s لفة في الدقيقة . بتطبيق قانون كيرشوف على كل من مرحلتى الملفات الابتدائية ، والملفات الثانوية ، المبيتين في الدائرة المكافئة شكل (١٢ - ٢) نجد أن :

$$V_1 + I_1 X_1 + I R_1 + E_1 = 0 \dots \dots \dots (٢-٢٣)$$

$$E_2 + S I_2 X_2 + I_2 R_2 = 0 \dots \dots \dots (٢-٢٤)$$

بالنسبة للدائرة المغناطيسية للمحرك ، فإن مجموع القوة الدافعة المغناطيسية للملفات الابتدائية مع القوة الدافعة المغناطيسية للملفات الثانوية (منسوبة إلى الملفات الابتدائية) يجب أن يساوى القوة الدافعة المغناطيسية التى تولد المجال المغناطيسى الدائر ، وهذا يترجم ، باستخدام التيارين ، الابتدائي I_1 والثانوى المنسوب I_2 ، وتيار اللاحمل I_0 ، بالمعادلة :

$$I_1 + I_2 = I_0 \quad (٢ - ٢٥)$$

المعادلات من ٢٠ إلى ٢٢ هى معادلات اتجاهية (Vector equations) ، وجميع الحدود الداخلة فى تركيبها تمثل كميات متجهة (Vectors) ، وهى ممثلة على هذا الاساس فى شكل (١٢ - ٢) ١) باشكال مقفلة فى اتجاه دائرى واحد . ويعطى حل هذه المعادلات الثلاث كل ما نحتاج إليه متصلاً بخواص

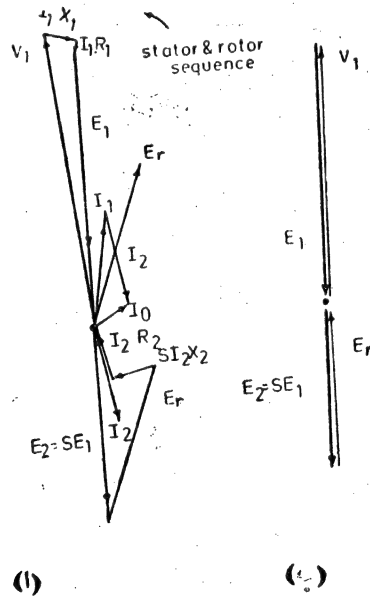
تشغيل المحرك ، كما يمكن الاهتداء بها ، ممثلة على مخطط المتجهات ، بعد تعديلها بإضافة الضغط المحقون ، لمعرفة طبيعة هذا الضغط المطلوبة ، بالنسبة لحجمه وزاويته المرحلية ، لكي يعطى تغييرا معيناً في السرعة أو معامل التدرية أو كليهما معا . وهذا يتم على النحو التالي :

١- دوران المحرك بسرعة أقل من سرعة التزامن (سرعة تحت التزامن Subsynchronous speed) مع التأثير على معامل القدرة :

إذا كان E_r (كمية متجهة) هو الضغط المرحلي المحقون ، فإن وجوده يؤدي إلى تعديل المعادلة (٢٤ - ٢) إلى :

$$E_2 + I_2 R_2 + S I_2 X_2 + E_r = 0 \quad (2-26)$$

وتظل المعادلتان الآخرتان كما هما ، فنحصل على مخطط المتجهات شكل (١٣ - ٢) أ ، الذي يبين كيف يؤدي انخفاض السرعة إلى زيادة مقدار E_2 ،



(شكل ١٣ - ٢) أ ، ب

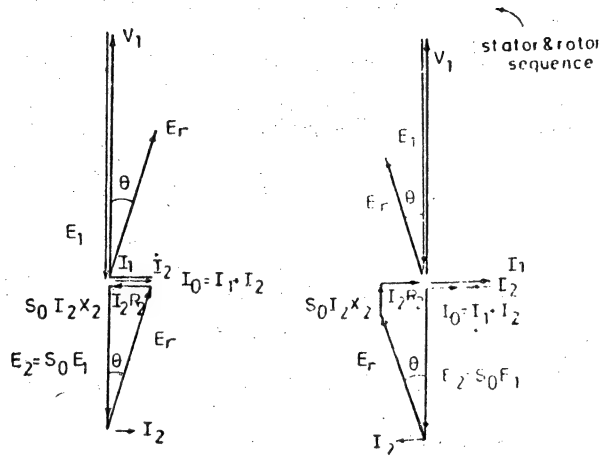
مما يستلزم وجود E_r بالعلاقة المرحلية المعطاة ، حيث يكون متأخرا على V_1 . فإذا كان انخفاض السرعة بدرجة ملحوظة ، بحيث يمكن إهمال هبوط الضغط في كل من المقاومة وممانعة التسرب المرحلية في الملفات ، يمكننا كتابة المعادلة (٢٦ - ٢) على النحو التالي :

$$E_2 + E_r \stackrel{\infty}{=} 0 , \therefore E_r \stackrel{\infty}{=} -E_2 \dots \dots (2-27)$$

يبين شكل (١٣ - ٢) ب مخطط المتجهات على أساس المعادلة (٢٧ - ٢) التي تعطينا العلاقة بين E_r ، E_2 من حيث أنهما متساويتان في المقدار ومتضادتان في الاتجاه . فمن ناحية العلاقة العددية يمكن أن نقول إن :

$$E_r \stackrel{\infty}{=} S_0 E_1 , \quad S_0 \stackrel{\infty}{=} \frac{E_r}{E_1} \stackrel{\infty}{=} \frac{E_r}{V_1} \stackrel{\infty}{=} \infty \dots (2-28)$$

وهذا يعني أن قيمة الضغط المحقون E_r ، اللازم لخفض السرعة إلى حد معامل الانزلاق S_0 ، هي $S_0 V_1$ على وجه التقريب ، بحيث يكون متأخرا بزاوية مرحلية صغيرة بالنسبة لضغط الينبوع V_1 أو يمكن اعتباره في اتفاق مرحلي تقريبا مع V_1 . وتكون النتيجة في هذه الحالة هي خفض السرعة بدون التأثير الملحوظ على معامل قدرة المحرك . فإذا أردنا التأثير على معامل القدرة بصورة ملحوظة يجب أن يتغير الوضع المرحلي للضغط المحقون E_r ، بحيث يعمل على تمرير مركبة تيار I_2 (في حالة اللاحمل) ، متأخرة على الضغط V_1 فتعوض الجزء الأكبر من التيار I_0 . (باعتباره مساويا I_n تقريبا) لكي يتحسن معامل القدرة ، كما يتبين لنا من شكل (١٤ - ٢) . وهذا يعني أن E_r تتخذ الوضع المرحلي المناسب ، بالتأخر على V_1 بالزاوية θ ، بحيث يصبح الجزء الأكبر من تيار التنبيه للمحرك (I_u) ساريا بفعل الضغط المحقون E_r ، مما يخفف من تأثيره الحثي على الينبوع الرئيسي ، فيتحسن معامل القدرة .



شكل (١٤-٢) ، ١ ب

وتكون الزاوية θ سالبة في هذه الحالة ، أى أن E_r يكون متأخرا على V_1 ، كما أن قيمة E_r العددية تكون أكبر من $E_1 S_0$ (في حالة اللاحمل) .
 فإذا أصبحت قيمة θ موجبة ، أى أن E_r تقدم على V_1 مرحليا ، وكانت قيمة E_r اصغر من $E_1 S_0$ (في حالة اللاحمل أيضا) فإن التيار I_2 الذى يسرى بفعل E_r يكون متقدما على الضغط V_1 ، مما يستدعى مرور تيار حتى كبير I_1 ، لكي يعوضه ، بالإضافة إلى مرور التيار I_0 الحثي أيضا . وهذا يعنى فقر في معامل القدرة ، كما يظهر في شكل (١٤ - ٢) ب .

ب — دوران المحرك بسرعة أعلى من سرعة التزامن (سرعة فوق التزامن Super-synchronous speed) مع التأثير على معامل القدرة :

عندما يدور المحرك بسرعة أعلى من سرعة التزامن ، يصبح الاتجاه النسبي لدوران المجال المغناطيسى الدائر بالنسبة للملفات الثانوية في عكس الاتجاه السابق ، وهذا يعنى أمرين :

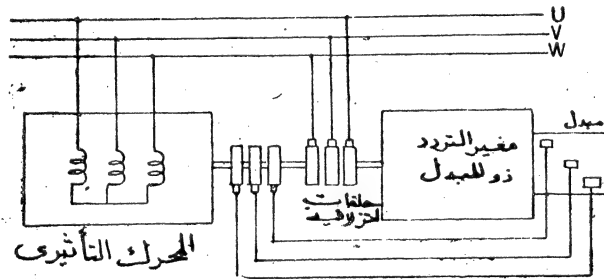
وكما سبق أن بينا في حالة تحت سرعة التزامن ، فإننا نستطيع تغيير السرعة بدون الالتفات إلى تغيير معامل القدرة ، الذي لا يتأثر تأثراً ملحوظاً في هذه الحالة ، كما أننا نستطيع التأثير على معامل القدرة ، بجانب تغيير السرعة . فبالنسبة للحالة الأولى نحصل على العلاقات في مخطط المتجهات كما هي في شكل (١٥ - ٢) ب ، وذلك مع إهمال هبوطات الضغط في الملفات ، واعتبار حالة اللاحمل ، حيث يتبين لنا أننا نحتاج إلى ضغط محقون في اتجاه مرحلي مضاد لاتجاه الضغط V_1 تقريباً . ويؤدي تغيير قيمة هذا الضغط المحقون إلى تغيير قيمة السرعة . أما الحالة الثانية فتفسرها العلاقات المبينة في شكل (١٥ - ٢) ج ، حيث يتضح لنا أن تحسين معامل القدرة ، مع رفع سرعة المحرك عن سرعة التزامن (باعتبار حالة اللاحمل) ، يحتاج إلى ضغط محقون متأخر عن ضغط الينبوع بزاوية مقدارها $(180 + \theta')$ (على أساس التعاقب المرحلي للملفات العضو الثابت) . يبين شكل (١٥ - ٢) د كيف يؤدي الحقن بضغط متقدم على ضغط الينبوع بزاوية مقدارها $(180 - \theta')$ (باعتبار التعاقب المرحلي للملفات الابتدائية) إلى فقر في معامل القدرة ، على أساس زيادة قيمة تيار الينبوع الحثي I_1 المسحوب من الينبوع في حالة اللاحمل .

مغير التردد ذو المبدل ومحرك الشراجا :

(The commutator frequency changer and the Schrage Motor)

لكي يمكننا تغيير سرعة المحرك التأثيري ثلاثي المراحل باستخدام ضغط محقون في الملفات الثانوية عن طريق الحلقات الانزلاقية ، يتعين علينا الحصول على ينبوع ضغط ثلاثي المراحل ذي تردد متغير ، بحيث يتساوى هذا التردد مع تردد التيار والضغط في الملفات الثانوية كلما تغيرت السرعة ، وبالتالي معامل الانزلاق s ، في المحرك التأثيري . وهذا يتأتى باستخدام مغير التردد ذي المبدل للحصول على الضغط المطلوب .

ويتكون مغير التردد ذو المبدل من عضو ثابت وعضو دائر . أما العضو الثابت فهو شبيه بالعضو الثابت في المحرك التأثيرى ، ولكنه خالى من الملفات ، وتكون مهمته فى هذه الحالة توفير المسار الحديدى المناسب ، ذى المعاوقة المغناطيسية الصغيرة ، لخطوط القوى المغناطيسية للمجال المغناطيسى الذى يقوم بتشغيل المحرك . وأما العضو الدائر فهو شبيه بالعضو الدائر فى المحرك التأثيرى ذى الحلقات الانزلاقية ، ولكنه يختلف عنه من ناحيتين : (أولا) أن الجارى تحتوى على نوعين مختلفين من الملفات ، منفصلين عن بعضهما تمام الانفصال ، أحدهما عبارة عن ملفات ثلاثية المراحل (رئيسية موصلة إلى الحلقات الانزلاقية فى ناحية من العضو الدائر) والآخر عبارة عن ملفات شبيهه بملفات التيار المستمر (مساعدة موصلة إلى مبدل فى الناحية الأخرى من العضو الدائر) ، كما هو مبين فى شكل (١٦ - ٢) . ويرتكز على هذا



شكل (١٦ - ٢)

المبدل ثلاث مجموعات من الفرش ، موصلة إلى فرش الحلقات الانزلاقية فى المحرك التأثيرى المراد حقنه بالضغط المطلوب (ثانيا) وجود المبدل ، إلى جانب الحلقات الانزلاقية ، ونوعين من الملفات ، كما سبق ذكره فى أولا ، علاوة على أن الملفات الرئيسية المتصلة بالحلقات الانزلاقية تتغذى من يذبوع التيار المتردد ثلاثى المراحل ، وذلك عن طريق فرش الحلقات الانزلاقية التى توصل

إلى الينبوع. وفي هذه الحالة يتولد مجال مغناطيسي دائر يدور بالنسبة للمقات
العضو الدائر بسرعة التزامن n_s ، التي ترتبط بتردد الينبوع f وعدد الأقطاب
 $2p$ المصممة على أساسها الملفات بالعلاقة $n_s = \frac{60 f}{p}$. ويتوقف اتجاه
دوران المجال بالنسبة للمقات على تعاقب توصيل مراحل الملفات إلى الينبوع،
وبذلك يمكن عكس هذا الاتجاه عن طريق تبديل توصيل اثنين من الفرش
إلى الينبوع. هذا وتتوقف سرعة دوران المجال المغناطيسي المطلقة بالنسبة إلى
الفراغ (absolute speed with respect to space) على اتجاه دوران
العضو الدائر وسرعته n . فإذا كان المجال المغناطيسي يدور بالنسبة للمقات العضو
الدائر بالسرعة n_s في نفس اتجاه دوران العضو الدائر بالسرعة n ، يصبح
المجال المغناطيسي دائراً في الفراغ بمجموع السرعتين $(n_s + n)$ ، أما إذا كان
المجال المغناطيسي يدور بالنسبة للمقات العضو الدائر بالسرعة n_s في عكس
اتجاه دوران العضو الدائر بالسرعة n ، يصبح المجال المغناطيسي دائراً في
الفراغ بفرق السرعتين $(n_s - n)$.

هذا وبالنسبة للمقات المساعدة الموصلة إلى المبدل، فإنها سوف تحتوى
على قوة دافعة كهربية يكون ترددها هو نفس تردد الينبوع f ، وذلك لأن
المجال المغناطيسي يدور بالنسبة لها (وهي راقدة في مجرى العضو الدائر)
بالسرعة n_s ، كما أنها مصممة على أساس نفس عدد الأقطاب للمقات الرئيسية
 $2p$ ($f = \frac{pn_s}{60}$). ولكن تردد القوى الدافعة الكهربية (أو الضغوط) المستخلصة
من المبدل عن طريق الفرش المرتكزة عليه (وهي ثابتة في الفراغ) يتوقف
على السرعة المطلقة للمجال المغناطيسي بالنسبة للفراغ [راجع كتاب هندسة
الآلات الكهربية ص ٣٠٧]

وهذا يعنى أنه عندما يدار العضو الدائر لمغير التردد ذى المبدل في عكس
اتجاه دوران المجال المغناطيسى الناشئ عنه [بترتيب اتصال فرش الحلقات
الانزلاقية بالينبوع بتعاقب معين] فإن تردد القوى الدافعة الكهربية المأخوذة

من فرش المبدل يكون متناسباً مع تردد الينبوع بالمقدار $\frac{n_s - n}{n_s}$ ، أى أن التردد يكون عبارة عن sf ، حيث s هو معامل الانزلاق المناظر لسرعة التزامن n_s مع سرعة الدوران n .

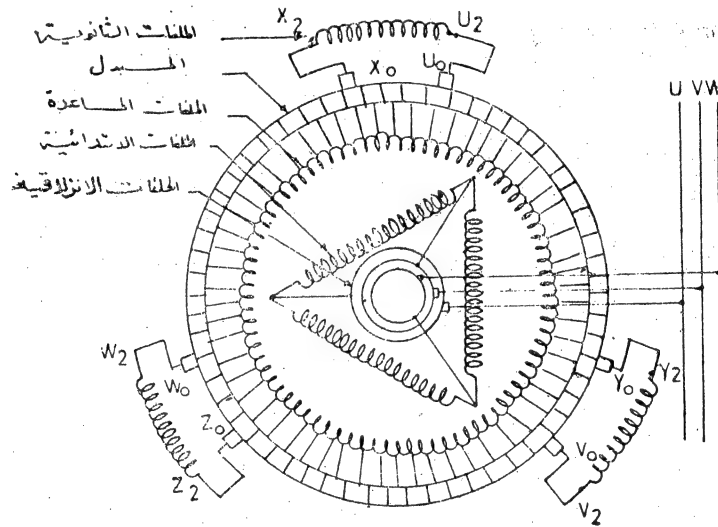
على هذا الأساس يتم ربط مغير التردد ذى المبدل ميكانيكياً (mechanical coupling) بالمحرك التآثيرى المراد حقن عضوه الدائر بالضغط ذى التردد المتغير ، بحيث يقوم المحرك التآثيرى بإدارة مغير التردد ذى المبدل فى عكس اتجاه دوران مجاله . وتكون تغذية المحرك التآثيرى من نفس الينبوع ذى التردد f ، وعدد أقطاب $2p$ أيضاً ، وسرعة التزامن فيه بناء على ذلك n_s ، ومعامل الانزلاق $s = \frac{n - n_s}{n_s}$ ، وذلك عندما يدور ويديز مغير التردد معه بالسرعة n . ويتم ترتيب اتصال كل من مغير التردد والمحرك التآثيرى بالينبوع على أساس التعاقب المرحلى لكل منهما ، الذى يؤدي إلى جعل المحرك التآثيرى يدير مغير التردد فى عكس اتجاه دوران مجاله المغناطيسى كما سبق ذكره . بهذا نضمن حقن الملفات الثانوية للمحرك التآثيرى عن طريق حلقاته الانزلاقية بالضغط المناسب لتغيير السرعة ، بحيث يكون تردد هذا الضغط مساوياً لتردد الضغط فى الملفات الثانوية عند جميع السرعات .

هذا ، ويحتاج تغيير السرعة إلى تغيير فى قيمة الضغط المحقون ، إلى جانب تغيير اختلافه المرحلى مع ضغط الينبوع ، ويتم ذلك عن طريق التحكم فى أوضاع الفرش على مبدل مغير التردد . وقد نحتاج إلى وضع محول بين الفرش على مبدل المغير والفرش على الحلقات الانزلاقية للمحرك للمساعدة فى الوصول إلى الغرض المطلوب .

لا شك أنه سوف يتبادر إلى ذهننا الخاطر الذى يتسأل عما إذا كان من الممكن استغلال مجارى العضو الثابت فى مغير التردد لتبسيط المجموعة السابقة

مع الوصول الى نفس الهدف . ويجب محرك الشرجا على هذا التساؤل بالايجاب ، بطريقة تدعو الى الاعجاب حقاً ، حيث يجمع في آلة واحدة نفس المهام التي تؤديها الآلتين السابقتين ، ويوفر لنا محركاً من النوع التأثري ، ادخلت عليه بعض التعديلات ، بهدف الحصول على محرك تأثري ذي سرعات متغيرة ، دون الاستعانة بترتيبات خارجية .

ويتكون محرك الشرجا من عضو ثابت يحتوى على ملفات ثلاثية المراحل ، على نمط المحرك التأثري ، ومن عضو دائر يحتوى على نوعين من الملفات ، رئيسية متصلة بحلقات انزلاقية ، ومساعدة متصلة بالمبدل ، على نمط العضو الدائر في مغير التردد ذي المبدل ، (شكل ١٧ - ٢) . وتكون الملفات



(شكل ١٧ - ٢)

الرئيسية والملفات المساعدة في مجارى العضو الدائر معزولة عن بعضها البعض تماماً ، وترقد كل منها في طبقة مستقلة من هذه المجارى ، التي تصنع على شكل خاص ، لكي تعطى للملفات ثوابت معينة . أما ملفات العضو الثابت فهي

مرتبة في المجارى على نمط الملفات ثلاثية المراحل في المحرك التآثيرى .
ويوصل طرفى اكل مرحلة من هذه الملفات الى زوج من مجموعات الفرش
التي تتركز على المبدل، بالنسبة لكل زوج من الأقطاب . ونرمز في الرسم
لطرفى المرحلة الأولى بالرمزين U_0 و X_0 ، وطرفى المرحلة الثانية
بالرمزين V_0 و Y_0 ، وطرفى المرحلة الثالثة W_0 و Z_0 . ويجب أن
نلاحظ أن كل طرف من هذه الأطراف يوصل الى مجموعات من الفرش
عددها يساوى عدد أزواج الأقطاب (p) ، اذا كانت الملفات المساعدة
ملفوفة لنا انطباعياً ، نظراً لأن نفس ترتيب الملفات يتكرر مع كل
زوج من الأقطاب . أما اذا كان اللف تموجياً ، فقد نكتفى بتوصيل
مجموعة واحدة من الفرش الى كل طرف ، أو نزيد على ذلك على حسب
كثافة التيار .

وعندما تكون مجموعتا الفرش الموصلتان الى طرفى احدى المراحل
مرتكزة على قطعة مبدل واحدة ، تصبح هذه المرحلة مقصورة . وتتحرك
الفرش على المبدل بترتيب ميكانيكى عن طريق عجلة تدار باليد (أو بمحرك) ،
بحيث يكون الانقراج الناشئ بين كل مجموعتين موصلتين الى طرفى
احدى المراحل واحداً فى المراحل الثلاث ، كما أن الانقراج يمكن أن
يكون متاثلاً على جانبي المرحلة (لتغيير السرعة فقط) ، أو قد تسبق احدى
مجموعتى الطرفين الأخرى فى حركتها ، بحيث يصبح الانقراج غير متماثل
على جانبي المرحلة (لتغيير السرعة ومعامل القدرة فى نفس الوقت) .

هذا ، وبعد أن يكون وضع مجموعتى فرش طرفى المرحلة على قطعة
المبدل ، حيث تكون ملفات المراحل الثلاث مقصورة ، يمكن أن يكون
الانقراج فى اتجاه يؤدي إلى إعطاء خفض فى السرعة مثلاً ، كما أنه يمكن
أن يكون فى الاتجاه المضاد (عند عكس اتجاه حركة كل من

مجموعتي الفرش على طرفي المرحلة) ، بحيث يؤدي إلى إعطاء ارتفاع في السرعة في هذه الحالة . وفي كلتا الحالتين يكون التغيير في السرعة متناسباً مع مقدار الانقراج ، الذي يحدد في هذه الحالة قيمة الضغط المأخوذ من الملفات المساعدة (على أساس عدد قطع المبدل التي تحصرها زاوية الانقراج) ، وهو الضغط المحقون في الملفات الثانوية ، التي تحتل مجارى العضو الثابت للمحرك .

بذلك نرى أن ملفات العضو الثابت سوف تعتبر هي الملفات الثانوية في هذا المحرك، بينما تعتبر الملفات الرئيسية ، ثلاثية المراحل ، الموجودة على العضو الدائر ، هي الملفات الابتدائية ، التي يتم تغذيتها من الينبوع . وهذا أول الفروق الجوهرية بين محرك الشراجا والمحرك التأثري المعتاد . ويكون الفرق الثاني في وجود الملفات المساعدة التي تستخدم في حقن الملفات الثانوية بالضغط اللازم لتغيير السرعة . ونبين فيما يلي كيف يتم تشغيل المحرك بهذه الأوضاع ، بحيث يستوفي الشرط اللازم بأن يكون تردد الضغط المحقون مساوياً لتردد ضغط الملفات الثانوية عند السرعات المختلفة . أما بالنسبة لقيمة الضغط المطلوب ، فهي تتحدد على أساس زاوية انقراج مجموعتي الفرش على طرفي كل مرحلة ، كما سبق ذكره .

يمكن تفسير ما يحدث في محرك الشراجا على أساس نظرية تشغيل المحرك التأثري المعتاد على النحو التالي : عند تغذية الملفات الرئيسية (الابتدائية) في محرك الشراجا من الينبوع ثلاثي المراحل تكون هذه الملفات ، مع العضو الدائر الذي تحتل أجزاء من مجاريه ، في حالة سكون لأول وهلة ، وينشأ مجال مغناطيسي دائر ، يدور بالنسبة للملفات ، وللعضو الدائر الذي يحملها وما زال ساكناً ، في أحد الاتجاهين (في اتجاه أو عكس اتجاه عقربي الساعة على حسب التعاقب المرحلي للتوصيل) ، وذلك بسرعة التزامن n

على أساس العلاقة المعروفة $f = \frac{pn_s}{60}$. بالقياس على طريقة تشغيل المحرك التأثيرى المعتاد نجد أن النتيجة المباشرة لتسلسل الأمور هو دوران العضو الذى يحمل الملفات الثانوية ، أى العضو الثابت فى محرك الشراجا ، وهذا غير ممكن بطبيعة الحال . ويكون رد الفعل المقابل لذلك فى هذه الحالة ، وهو الذى يعطى تأثيرات بديلة مماثلة ، أن يدور العضو الدائر نفسه فى عكس اتجاه دوران المجال المغناطيسى الذى أنشأه .

وتتوالى الأمور بعد ذلك بصورة مشابهة لما يحدث فى المحرك التأثيرى المعتاد ، فتردد سرعة العضو الدائر n ، وتغير قيم القوى الدافعة الكهربائية والتيارات المنتجة فى الملفات الثانوية بالتأثير ، على أساس تغير قيمة معامل الانزلاق s . وتحدد قيمة معامل الانزلاق s على أساس سرعة المجال المغناطيسى بالنسبة للملفات الثانوية ، وهى $n_s - n$ فى المحرك التأثيرى المعتاد ، ولها نفس القيمة فى محرك الشراجا ، وذلك لأن العضو الدائر فى هذا المحرك يدور بالنسبة لهذه الملفات ، وبالتالي بالنسبة للعضو الدائر نفسه ، بالسرعة n_s فى عكس الاتجاه ، فتكون سرعة المجال المغناطيسى المطلقة بالنسبة للفراغ ، وبالنسبة للملفات الثانوية على العضو الثابت ، هى $n_s - n$ كما فى المحرك التأثيرى المعتاد . وهذا يعنى أن قيمة القوة الدافعة الكهربائية المتولدة بالتأثير بفعل المجال المغناطيسى الدائر تتناسب مع معامل الانزلاق s ، وكذلك ترددها وتردد التيارات السارية بفعلها . وتكون قيمة القوة الدافعة الكهربائية المرحلية عندما يكون العضو الدائر ما زال فى حالة السكون القوة الدافعة الكهربائية السكونية كما أسميناها فى حالة المحرك التأثيرى المعتاد (E_{20} متوقعة على عدد اللفات لكل مرحلة فى الملفات الثانوية على العضو الثابت ومعامل اللف ، وعدد خطوط المجال المغناطيسى المتبادل ϕ_m ، وهو المجال المغناطيسى الدائر الناشئ عن ملفات العضو الدائر الواصلة

إلى الينبوع). كذلك تكون قيمة القوة الدافعة الكهربائية المرحلية في الملفات الثانوية عند أى معامل انزلاق S هي $E_{2s} = SE_{20}$ وتردها $f_{2s} = sf_1$ ، تماما كما هو الحال في المحرك التأثيرى المعتاد ، غاية ما فى الأمر هو أن الملفات الابتدائية والملفات الثانوية تبادلت مواقعها ، فأصبحت الابتدائية على العضو الدائر ، وأصبحت الثانوية على العضو الثابت ، دون أدنى تغيير فى خواص التشغيل للمحرك التأثيرى المعتاد، المتعلقة بوجود نوعى الملفات على محرك الشراجا .

بناء على ذلك كله ، نجد أنه عندما تكون كل مجموعتين من الفرش المتصلة بطرفي نفس المرحلة (U_0, X_0 أو V_0, Y_0 أو W_0, Z_0) مرتكزة على احدى قطع المبدل فإن المراحل الثانوية الثلاثة تصبح فى حالة قصر ، ويعمل محرك الشراجا كمحرك تأثيرى معتاد انعكس وضع ملفاته الابتدائية والثانوية، ولكنه يمتلك نفس خواص تشغيل المحرك التأثيرى المعتاد بالضبط . وعلى هذا الأساس فإن محرك الشراجا يدور فى هذه الحالة بسرعة n لفة فى الدقيقة قريبة جدا من سرعة التزامن n_s لفة فى الدقيقة ، التى تتحدد مع اقطاب المحرك $2p$ وتردد الينبوع بالعلاقة $n_s = \frac{60f_1}{p}$ ، ويكون معامل الانزلاق هو

$$S = \frac{n_s - n}{n_s}$$

أما بالنسبة للملفات المساعدة ، فإن المجال المغناطيسى ، الناشئ عن الملفات الابتدائية الموجودة معها على العضو الدائر فى نفس المجارى ، يدور بسرعة التزامن n_s بالنسبة لها . وعلى ذلك فإن القوى الدافعة الكهربائية التى تتولد فى الملفات المساعدة بفعل المجال المغناطيسى الدائر تتناسب فى مقاديرها مع f_1 ، ويكون ترددها f_1 أيضا . ولكن عند أخذ هذه القوى الدافعة الكهربائية من الفرش عن طريق المبدل، تكون قد مرت بعملية التبديل التى تجعل ترددها f_b مناظرا لعدد الاقطاب $2p$ وسرعة المجال المغناطيسى بالنسبة للفرش الثابتة ، أى

سرعة المجال المغناطيسي المطلقة بالنسبة للفراغ ، وهي $(n_s - n)$ ، كما سبق شرحه (راجع التبديل في كتاب هندسة الآلات الكهربية صفحة ٣٠٥) .

وهذا يعني أن الضغط E_b الذي يؤخذ بين طرفي كل مجموعتين من مجموعات الفرش على طرفي كل مرحلة من المراحل الثانوية ، عند انقراج هاتين المجموعتين على سطح المبدل ، تتوقف قيمته على مقدار زاوية الانقراج ، وبالتالي عدد قطع المبدل المحصورة بين المجموعتين ، ويكون تردده f_b عبارة عن
$$b = \frac{(n_s - n)}{60} = s f_1$$
 ، وهو تردد القوى الدافعة الكهربية

المتولدة في الملفات الثانوية . وهذا ما يجعل E_b صالحا للاستخدام لحقن الملفات الثانوية لتغيير سرعة المحرك . ومن ناحية أخرى فإن اتجاه E_b يمكن أن يتغير إذا تغير اتجاه حركة مجموعتي الفرش على طرفي كل مرحلة ، بمعنى أنه إذا كانت E_b تصبح في اتجاه E_{2s} عندما تتحرك الأطراف U_0 ، V_0 ، W_0 في اتجاه معين على سطح المبدل (وتتحرك X_0 ، Y_0 ، Z_0 في نفس الوقت في الاتجاه المضاد لاعطاء زاوية انقراج معينة) ، فإن عكس اتجاه حركة نفس هذه الأطراف بحيث تتحرك في الاتجاه المضاد على سطح المبدل ، يجعل E_b تصبح في عكس اتجاه E_{2s} ، مما يعني اختلافها في الإشارة .

إن التعادل الذي يحدث بين الضغط المحقون من الفرش في كل مرحلة $\pm E_b$ ، والقوة الدافعة الكهربية المرحلية E_{2s} ، التي تتولد في هذه المرحلة بفعل المجال المغناطيسي الدائر ، هذا التعادل هو الذي يحدد السرعة التي يدور عندها المحرك على النحو التالي :

$$E_{2s} = \pm E_b$$

$$sE_{20} = \pm E_b , (n_s - n) E_{20} = \pm n_s E_b$$

$$n = n_s \left(1 \mp \frac{E_b}{E_{20}} \right) \dots \dots \dots (٢ - ٢٩)$$

ومما تجدر ملاحظته أنه عندما تكون E_b في اتجاه E_{2s} ($E_{2s} = + E_b$) ، فإننا نحصل على السرعات المنخفضة $n = n_s \left(1 - \frac{E_b}{E_{20}} \right)$ ، وهي السرعات التي تقل عن سرعة التزامن n_s (subsynchronous) . وعندما تكون E_b في عكس اتجاه E_{2s} ($E_{2s} = - E_b$) ، فإننا نحصل على السرعات المرتفعة $n = n_s \left(1 + \frac{E_b}{E_{20}} \right)$ ، وهي السرعات التي تعلق عن سرعة التزامن n_s (supersynchronous) . وبذلك فإن تغيير السرعة في محرك الشراجا ينشأ أساساً عن طريق تغيير قيمة E_b واتجاهها بالنسبة لـ E_{2s} ، وهذا يكون بتغيير قيمة زاوية انقراج طرفي كل مرحلة على سطح المبدل ، ثم تغيير اتجاه حركة هذين الطرفين في أثناء الانقراج .

ويعتبر محرك الشراجا من أوسع المحركات الكهربائية انتشاراً ، وهو يستخدم بكثرة في مصانع النسيج ، التي تحتاج إلى محركات متغيرة السرعة . هذا ويتم تحريك الفرش على سطح المبدل إما يدوياً بواسطة عجلة تنقل الحركة اليدوية إلى حاملات الفرش عن طريق صندوق تروس (Gear Box) ، أو بواسطة محرك مرشد صغير يتم التحكم فيه باستخدام زرار ضاغط ، بحيث تواصل الفرش حركتها مادام الضغط مستمراً على الزرار الذي يجعل المحرك المرشد دائراً .

هذا ونظراً لأن القدرة P_{st} التي يأخذها محرك الشراجا عند البدء من الازدواج تتناسب طردياً مع السرعة الزاوية ω_{st} وعزم دوران معين T_{st} عند البدء $\left(T_{st} = \frac{P_{st}}{\omega_{st}} \right)$ ، يجب أن يراعى وجوب بدء المحرك على أدنى سرعة له n_{min} ، لكي يسحب المحرك أقل تيار ممكن عند البدء . فإذا كان أقصى انقراج للفرش يعطى قيمة النهاية العظمى للقوة الدافعة الكهربائية بين كل مجموعتين من الفرش E_{bm} ، التي تحقق في كل مرحلة من المراحل الثانوية ، نجد عندما تكون E_{bm} و E_{20} في نفس الاتجاه أن :

$$n_{\min} = n_s \left(1 - \frac{E_{bm}}{E_{20}} \right) \quad (2-30)$$

وبديهي أنه عندما تكون E_{bm} و E_{20} في اتجاهين متضادين ، فإنها تكون مختلفتين في الإشارة ، وحينئذ فإن المحرك يعطى أعلى سرعة له n_{\max} حيث تكون

$$n_{\max} = n_s \left(1 + \frac{E_{bm}}{E_{20}} \right) \quad (2-31)$$

وقد سبق أن بينا أن تردد الضغط في الملفات المساعدة هو تردد اليزبوع f_1 ، لذلك فإن الضغط E_{bm} المأخوذ من هذه الملفات عن طريق المبدل لا تتوقف قيمته على السرعة ، وإنما تتوقف على عدد قطع المبدل التي يحرصها أقصى انقراج لزاوية مجموعتي الفرش على طرفي كل مرحلة ، وهذا العدد ثابت في نفس المحرك بطبيعة الحال . ونظرا لأن قيمة كلا من E_1 و E_{20} تتوقف على f_1 أيضا ، إلى جانب أن قيمة كل من الضغوط الثلاثة E_{bm} و E_1 و E_{20} تتوقف على قيمة الفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية ϕ_m ، يمكن اعتبار أن جميع هذه الضغوط تتناسب مع بعضها البعض ، على أساس عدد معين من اللفات الفعالة في كل مرحلة لجميع أنواع الملفات على المحرك . فإذا اعتبرنا أن عدد اللفات لكل مرحلة (Effective turns per phase) في الملفات الابتدائية هي T_{e1} وفي الملفات الثانوية هي T_{e2} وفي الملفات المساعدة هي T_{ea} ، نجد أن :

$$E_1 : E_{20} : E_{bm} = T_{e1} : T_{e2} : T_{ea} \quad (2-32)$$

هذا ويجب ألا ننسى في خلال ذلك كله أن التحليل السابق ينصب على أساس شكل (١٧ - ٢) ، وهو يمثل نموذج للمحرك ذي قطبين فقط ، وعندما تعدد الأقطاب في المحرك فإن تقسيم الملفات المساعدة على المراحل الثلاثة (راجع كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربائية الباب الأول) يستوجب أن تتكرر مجموعات الفرش بعدد أزواج الأقطاب . فإذا كان عدد أقطاب

المحرك ستة مثلاً يصبح عدد مجموعات الفرش ثمانية عشرة بدلاً من ستة ، وذلك لأن طرفي كل مرحلة من المراحل الثانوية يوصل إلى ثلاث مجموعات من الفرش ، التي تأخذ أوضاعاً متماثلة تحت ثلاثة أقطاب متشابهة ، عند ارتكازها على المبدل . هذا إذا كان لف الملفات المساعدة من النوع الانطباقي (lap winding) . أما إذا كان لف الملفات المساعدة من النوع التموجي (Wave Winding) ، فإنه يكفي استخدام ستة مجموعات من الفرش ، إذا كان التيار صغيراً ، حيث يكون p من الملفات الواقعة تحت الأقطاب المتشابهة متصلاً على التوالي مع كل مجموعة بطبيعة اللف التموجي نفسه (راجع كتاب هندسة الآلات الكهربائية في اللف التموجي البسيط) . أما إذا كان التيار كبيراً ، بحيث يستوجب وجود عدد من المسارات المتوازية ، فإن عدد مجموعات الفرش يتكرر p مرة كما في حالة اللف الانطباقي سواء بسواء .

مثال محلول (١) :

an 8 pole , 50 Hz schrage motor has at standstill a stator Voltage of 52 V/phase and a maximum Voltage on commutator of 30 V . Find the highest and lowest no load speed .

$$E_{20} = 52 \text{ V} , E_{bm} = 30 \text{ V} , n_s = \frac{60 f_1}{p} = 750 \text{ r.p.m.}$$

$$n_{min} = n_s \left(1 - \frac{E_{bm}}{E_{20}} \right) = 750 \left(1 - \frac{30}{52} \right) = 317 \text{ r.p.m.}$$

$$n_{max} = n_s \left(1 + \frac{E_{bm}}{E_{20}} \right) = 750 \left(1 + \frac{30}{52} \right) = 1183 \text{ r.p.m.}$$

يلاحظ أنه لاعتبارات فنية في تصميم محركات الشراجا تكون نسبة

$$\frac{E_{bm}}{E_{20}} \text{ بحيث يتراوح تغيير السرعة عادة ما بين } 50\% \text{ و } 100\% \text{ من سرعه التزامن .}$$

مثال محلول (٢) :

A 12 pole 50 Hz induction motor With 6 slip rings has a standstill rotor voltage of 600 V/phase. Together With a rotary converter and a motor generator, it forms a Scherbius cascade. The motor generator, consists of a D. C. motor with a maximum e. m. f. of 550 V and an alternator. Find the lowest no load speed of the induction motor .

يبين شكل (١١ - ٢) توصيلة المجموعة كما هي معطاة في المسألة . وقد سبق أن ذكرنا أن المحول الدائر (rotary converter) يأخذ الضغط المتردد من الحلقات الانزلاقية للمحرك التأثيرى من ناحية، ويحوّله إلى ضغط مستمر على الناحية الأخرى، لكي يغذى به محرك التيار المستمر . ونضيف هنا أن نسبة التحويل تكون على النحو التالى :

$$E_{ac} = \frac{E_{dc}}{\sqrt{2}} \sin \frac{\pi}{m} \quad (٢ - ٣٣)$$

حيث E_{ac} هو الضغط المرحلى من ناحية الحلقات الانزلاقية للمحول الدائر و E_{dc} هو الضغط المستمر من ناحية المبدل، و m هو عدد الحلقات الانزلاقية . ويكون E_{ac} في هذه الحالة هو نفس الضغط المأخوذ من الحلقات الانزلاقية للمحرك التأثيرى أى E_2 ، أى أن :

$$E_2 = SE_{20} = E_{ac} = \frac{E_{dc}}{\sqrt{2}} \sin \frac{\pi}{6} \quad (٢ - ٣٤)$$

وهذا يعنى أنه بالنسبة لأقل سرعة ممكنة (قيمة النهاية الصغرى للسرعة) فى المحرك التأثيرى ، نحصل على أكبر قيمة للانزلاق s ، وهى التى تتناظر أكبر قيمة للضغط المستمر E_{dc} ، الذى يغذى محرك التيار المستمر ، وتنص المسألة على أنه ٥٥٠ فولت .

$$\therefore 600 S = \frac{550}{\sqrt{2}} \times \frac{1}{2} , S = 0.324$$

$$n = n_s (1 - S)$$

$$n_{min} = \frac{60 \times 50}{6} \times 0.676 = 338 \text{ r.p.m.}$$

المولد التآثيرى : (The Induction Generator)

عندما تزداد سرعة المحرك التآثيرى، الذى يدور بدون حمل، بواسطة آلة تستخدم لادارته فى نفس اتجاه دورانه الأسمى، تقل قيمة معامل الانزلاق S ، وبالتالى قيمة القوة الدافعة الكهربية E_{2s} المنتجة بالتآثير فى ملفات العضو الدائر، والتيار I_{2s} الناشء عنها، وترددهما f_{2s} ، كلما زادت السرعة، حتى تصل جميعها إلى قيمة الصفر عندما تصل سرعة دوران العضو الدائر n إلى سرعة التزامن n_s . فإذا زادت سرعة دوران العضو الدائر عن n_s ، تأخذ S قيمة سالبة، حيث تصبح $n > n_s$. وهذا يعنى أن الفيض المغناطيسى الدائر أصبح يدور بالنسبة للمفات العضو الدائر فى اتجاه مضاد لاتجاهه القديم، مما يؤدى إلى عكس اتجاه E_{2s} وبالتالى I_{2s} بالنسبة لاتجاههما الأول. وهذا يعنى عكس القدرة بالنسبة لليدوع، فبعد أن كانت مسحوبة منه أصبحت محقونة فيه، وانعكس عمل المحرك التآثيرى إلى مولد تآثيرى. وتكون الآلة التى رفعت سرعة العضو الدائر إلى ما بعد سرعة التزامن هى مصدر القدرة الميكانيكية التى يحولها المولد التآثيرى إلى قدرة كهربية يغذى بها اليدوع.

وينبغى أن نلاحظ أن المولد التآثيرى لابد أن يكون موصلاً إلى اليدوع أصلاً، حتى يتسنى له أن يأخذ منه تيار المغطسة الذى ينشئ المجال المغناطيسى الدائر، وهو أساس تشغيل المولد التآثيرى، بالقياس على ما سبق شرحه فى حالة المحرك التآثيرى. ويحدد تردد هذا اليدوع f_1 ، مع عدد أقطاب المولد

$2p$ ، سرعة التزامن n_s التي ينبغي أن تزيد عنها سرعة دوران العضو الدائر للمولد n ، حتى يمكن تغذية الينبوع بالقدرة الفعالة المطلوبة $(n > n_s = \frac{60f_1}{p})$. ويأخذ المولد هذه القدرة الفعالة في شكل قدرة ميكانيكية من الآلة الميكانيكية التي تدير عضوه الدائر ، ويحولها إلى قدرة كهربية يغذى بها الينبوع . أما القدرة غير الفعالة اللازمة لتواجد المجال المغناطيسي فإن المولد يأخذها من الينبوع نفسه . فإذا اعتبرنا أن تيار المغنطة هو تيار الاثارة ، على نحو مماثل لما تفعله في آلات التيار المستمر ، نستطيع أن نقول إن المولد ذو إثارة منفصلة (separately excited) في هذه الحالة .

ومن الواضح أن تشغيل المولد التأثيرى على النحو السابق يستلزم أن يكون عاملا معه على نفس الينبوع مولد أو مولدات مترامنة ، تتكفل بتغذيته بالقدرة غير الفعالة المتخلفة مرحليا (lagging reactive power) ، اللازمة لتزويده بتيار الاثارة .

وحينئذ تصبح هذه القدرة غير الفعالة حملا زائدا على المولدات المترامنة ، بينما يمكن تقسيم القدرة الفعالة بين المولد التأثيرى والمولد المترامن ، لكي يتعاونوا في تغذية الحمل على النحو المطلوب ، كما سوف يتبين من المثال الآتى فيما بعد .

هذا ويمكن للمولد التأثيرى أن يغذى حملا مفردا (isolated load) ، وفي هذه الحالة يجب تزويده بوسيلة للاثارة الذاتية (self excitation) . ويكون ذلك عن طريق توصيل مكثفات على التوازي مع أطراف الملفات في العضو الثابت . ويمكن التحكم في قيمة التردد f ، الذى تتحدد على أساسه سرعة التزامن n_s ، بتغيير سعة هذه المكثفات .

مثال محلول :

A synchronous generator supplying 2000 KW operates in

parallel with an induction generator supplying 1000 KW. The load has a power factor of 0.8. The induction generator has a power factor of 0.95. Find the power factor at which the synchronous machine is working.

حمل القدرة الفعالة الكلى على المولدين عبارة عن :

$$2000 + 1000 = 3000 \text{ KW}$$

حمل القدرة غير الفعالة المتأخرة عبارة عن :

$$\frac{3000}{\cos \phi_1} \times \sin \phi_1 = 3000 \tan \phi_1 = 3000 \tan 36.7^\circ$$

$$= 3000 \times 0.75 = 2250 \text{ KVAR}$$

حيث ϕ_1 الزاوية المرحلية للحمل وتساوى $\cos^{-1} 0.8 = 36.7^\circ$. يحتاج المولد التأثيرى إلى قدرة غير فعالة متأخرة لتغذيته بتيار الاثارة وهى عبارة عن:

$$\frac{2000}{\cos \phi_{I.G.}} \sin \phi_{I.G.} = 1000 \tan (\cos^{-1} 0.95)$$

$$= 1000 \times (0.3283) = 328.8 \text{ KVAR}$$

يتعين على المولد المتزامن أن يمد كلا من المولد التأثيرى والحمل بالقدرة غير الفعالة المتأخرة التى يحتاجان إليها ، وبذلك تصبح القدرة غير الفعالة المتأخرة التى يعطيها المولد المتزامن عبارة عن :

$$2250 + 328.8 = 2578.8 \text{ KVAR}$$

ويعطى المولد المتزامن قدرة فعالة مقدارها ٣٠٠٠ كيلووات ، فيكون عاملا على معامل قدرة متأخر $\cos \phi_{S.G.}$ عبارة عن :

$$\cos \phi_{s.g.} = \cos \left(\tan^{-1} \frac{2578.8}{2000} \right) = 0.613$$

لم يجد المولد التأثيرى مجالا للعمل بالمقارنة مع الامتيازات الكثيرة التي نحصل عليها من استخدام المولد المتزامن ، ولذلك ظل مجال استخدامه محدودا جدا ، ويكاد يكون مقصورا على ناحية البحث العلمى فقط . هذا على الرغم من بعض المزايا الخاصة التي يمكن أن نحصل عليها من استخدام المولد التأثيرى ، حيث أن الأجهزة المساعدة التي نحتاج إليها تكون أقل مما نحتاج إليه في حالة المولد المتزامن ، كما أن تشغيل المولدات التأثيرية على التوازي يمكن أن يتم عند أى تردد ، وبدون خوف من حدوث تأرجح ، إلى جانب أن تغيرات السرعة الناتجة عن الآلة التي تدير المولد تكون غير ذات أهمية مع هذا النوع من المولدات . ومن المزايا الهامة للمولد التأثيرى أن الاثارة تنهار عند حدوث دائرة قصر ، وهذا يعنى أن الضغط المتولد ينهار أيضا ، وكذلك قدرة المخرج ، مما يعطى المولد خاصية الحماية الذاتية . ولاننسى في هذا المجال ما يمكن أن يتمتع به المولد المتأثيرى من صلابة وقدرة على الاحتمال عندما يكون عضوه الدائر ذا قفص سنجابى .

وأهم ما يعيب المولد التأثيرى ، وهو ما حدد مجال استخداماته حتى الآن ، الحاجة إلى تشغيله على يذبوع تغذية مولدات متزامنة ، تتكفل بتزويده بالقدرة غير الفعالة المتأخرة ، كما سبقت الإشارة إليه ، وكذلك معامل قدرته المنخفضه .

هذا وتكون الآلة التأثيرية (محرك تأثيرى) ، الموصلة إلى الينبوع المناسب ، جاهزة للتشغيل كمحرك أو كمولد تأثيرى على حسب ما إذا كان معامل الانزلاق موجبا (سرعة العضو الدائر أقل من سرعة المجال المغناطيسى فى نفس الاتجاه) ، أو كان معامل الانزلاق سالبا (سرعة العضو الدائر أكبر من سرعة المجال المغناطيسى فى نفس الاتجاه بفعل آلة محرّكة ترفع السرعة بطبيعة الحال) . ويستفاد من هذه الخاصية فى المحركات التأثيرية العاملة مع الاوناش عند انزال

الأحمال ، حيث تتحدد السرعة آليا بقيمة أعلى قليلا من سرعة التزامن عندما يصبح المحرك التآثيرى عاملا كمولد . وتحدث نفس هذه الظاهرة مع القارات التي تسير بالمحركات التآثيرية ، فتتحدد سرعتها على نحو مماثل عند هبوطها على المنحدرات .

مثال محلول :

An induction generator having a synchronous speed of 750 r.p.m. is driven at 300 r.p.m., and, with the rotor short circuited, the stator output is 9 KW. Determine (a) the rotor copper loss (b) the rotor resistance per phase, given that the Voltage across slip-rings at stand still equals 260 V. Neglect rotor reactance. (c) By the addition of external resistance in the rotor circuit the stator output is reduced to 4 KW. Determine the value of the external resistance inserted per phase.

تستخدم مع المولد التآثيرى نفس علاقات القدرة ومعامل الانزلاق التي سبق استخدامها مع المحرك التآثيرى ، مع مراعاة أن معامل الانزلاق هنا تسبقه إشارة سالبة ، وأن اتجاه سريان القدرة من عمود الإدارة إلى اليذبوع . وفى هذه الحالة نجد أن قدرة المدخل P_i هي قدرة ميكانيكية تعطى على عمود الإدارة . وباستخلاص قدرة المقدرات الميكانيكية P_i منها تبقى القدرة الميكانيكية النافعة P_m حيث :

$$P_m = P_i - P_f \quad (٢-٣٥)$$

وتكون العلاقة بين P_m ومفقودات العضو الدائر النحاسية P_{cu2} وقدرة الثغرة الهوائية P_g ، مع مراعاة الإشارة السالبة لمعامل الانزلاق ، هي :

$$P_g : P_m : P_{cu2} = 1 : (1 + S) : S \quad (٢-٣٦)$$

حيث أن مجموع P_g و P_{cu2} عبارة عن P_m في هذه الحالة ، لأن P_m هي التي تزودنا بها معا . وبانتقاص منقودات العضو الثابت P_{st} من قدرة الثغرة الهوائية ، التي تأتي من العضو الدائر في هذه الحالة ، نحصل على قدرة المخرج P_0 التي يغذى بها المولد الينبوع .

$$P_0 = P_2 = P_g - P_{st}$$

(١) ونظرا لأن P_{st} ليست معطاة في المسألة فإننا نهملها ، ونعتبر أن :

$$P_0 = P_g = 9000 \text{ W}$$

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{750 - 800}{750} = - 0.0667$$

$$P_{cu2} = s P_g = \frac{5}{75} \times 9000 \text{ W} = 600 \text{ W}$$

(ب) نستخدم نفس العلاقة التي حصلنا عليها في المحرك التائيري لإيجاد التيار في ملفات العضو الدائر ، فنجد أن :

$$I_{2s} = \frac{E_{20}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{20}^2}}$$

ويمكن إهمال X_{20} بالنسبة لـ $\frac{R_2}{s}$ كما هو منصوص عليه في المسألة،

$$I_{2s} R_2 = S E_{20} \quad , \quad I_{2s}^2 = \frac{S^2 E_{20}^2}{R_2^2}$$

$$600 = P_{cu2} = 3 I_{2s}^2 R_2 \quad , \quad I_{2s}^2 = \frac{600}{3 R_2}$$

$$\begin{aligned} \therefore R_2 &= \frac{3 S^2 E_{20}^2}{600} = \frac{3 \times (0.0667)^2 \times (260/\sqrt{3})^2}{600} \\ &= 0.5 \text{ ohm} \end{aligned}$$

(ح) ويلاحظ أن سرعة الآلة المحركة ٨٠٠ لفة في الدقيقة لاعلاقة لها بدخول أو خروج مقاومة في العضو الدائر ، فهي تظل ثابتة ، وكذلك سرعة المجال المغناطيسي n_s . فعند اضافة مقاومات في ملفات العضو الدائر لا تتغير قيمة معامل الإنزلاق S ، ولكن تتغير مفقودات العضو الدائر النحاسية (نتيجة لتغير قيمتى المقاومة I_{2s} و I_2) ، وكذلك القدرة P_m ، التي تقل قيمتها فتقل بالتالى قدرة المخرج إلى الينبوع . وفي هذه الحالة نحصل على العلاقات الآتية ، بفرض أن المقاومة التى اضيفت قيمتها R_a لكل مرحلة :

$$P_0 = P_g = 4000 = \frac{3 I_{2s}^2 (R_2 + R_a)}{S}$$

$$I_{2s}^2 = \frac{4000 S}{3 (R_2 + R_a)} , \quad I_{2s}^2 = \frac{S^2 E_{20}^2}{(R_2 + R_a)^2}$$

$$\therefore (R_2 + R_a) = \frac{3 S E_{20}^2}{4000} = \frac{0.0667 \times (260 / \sqrt{3})^2}{4000}$$

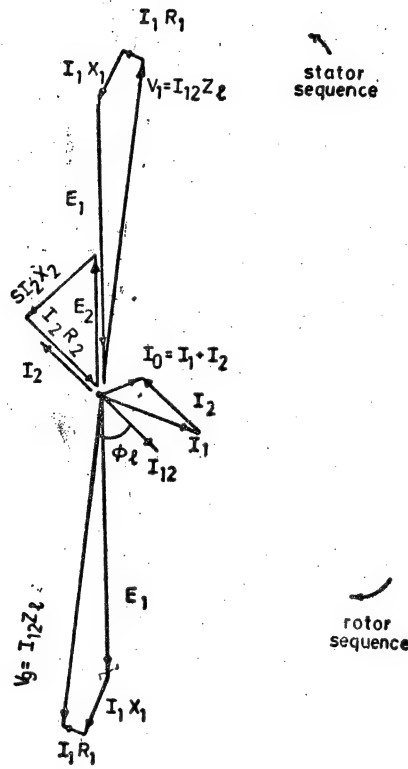
$$= 1.125 \text{ ohm}$$

$$R_a = (1.125 - 0.5) = 0.625 \text{ ohm}$$

يبين لنا المثال السابق خاصية هامة للمولد التأثيرى ، وهى احتمال تغيير قدرة المخرج المعطاة للينبوع، عن طريق تغيير المقاومة المرحلية فى ملفات العضو الدائر. ويمكن الاستفادة من هذه الخاصية فى المولدات ذات الحلقات الإنزلاقية فقط بطبيعة الحال . ويكون ازدياد قيمة المقاومة فى ملفات العضو الدائر عاملاً على نقص قدرة المخرج للينبوع . ويلاحظ أن كلا من قدرة الثغرة الهوائية ومفقودات النحاس فى العضو الدائر تنخفض فى هذه الحالة أيضاً ، وذلك حتى يظل التناسب بين القدرات الثلاث متساوياً مع التناسب بين S : $(1+S)$: 1 ، الذى يظل ثابتاً بثبوت قيمة S .

نختم هذا الجزء الخاص بالمولد التأثيرى برسم مخطط المتجهات، شكل

(١٨ - ٢) ، على نفس المنوال الذي تم به رسم مخططات المتجهات للمحرك التأثيرى عند تغيير سرعته بالضبط المحقون [الأشكال من (١٢ - ٢) إلى (١٥ - ٢)] . وفي هذه الحالة يمكن التعويض عن ضغط الينبوع V_1 في



شكل (١٨ - ٢)

المعادلة (٢٠ - ٢) بهبوط الضغط في الحمل $I_{12} Z_1$ ، لكي نحصل على المعادلة الخاصة بالمولد التأثيرى على النحو التالى :

$$E_1 + I_{12} Z_1 + I_1 R_1 + I_1 X_1 = 0 \quad (٢ - ٣٧)$$

يكون الضغط المتولد على طرفي الآلة V_g مساويا لـ $(-I_{12}Z_1)$ ،
وبالتعويض بهذه العلاقة في المعادلة (٢-٣٢) نجد أن :

$$V_g = E_1 + I_1 R_1 + I_1 X_1 \dots \dots \dots (٢-٣٨)$$

يكون الينبوع الذي يمد الآلة بتيار اللاحمل I_0 متصلا على التوازي مع الحمل ، ويكون ضغطه V_1 مساويا لهبوط الضغط في الحمل $I_{12} Z_1$ ، كما سبق ذكره ، بحيث يمكننا تعديل المعادلة (٢-٣٢) على النحو التالي :

$$V_1 + I_1 X_1 + I_1 R_1 + E_1 = 0 \dots \dots (٢-٣٩)$$

يكون تيار اللاحمل I_0 ، الذي يزود به المولد من الينبوع ، متأخرا على ضغط الينبوع V_1 ، ويعمل المجال المغناطيسي على توليد القوة الدافعة الكهربية E_1 في ملفات العضو الثابت ، والقوة الدافعة الكهربية E_2 في ملفات العضو الدائر . وعندما يكون العضو الدائر مدارا بسرعة أعلى من سرعة التزامن ، فإن اتجاه E_2 يكون في عكس اتجاه E_1 ، كما أن التعاقب المرحلي في دائرة العضو الدائر يكون مضادا لاتجاهه في ملفات العضو الثابت . ونظرا لأن دائرة العضو الدائر حثية بطبيعتها (inductive circuit) فإن I_2 سوف يكون متأخرا على E_2 ، مع مراعاة التعاقب المرحلي المعكوس في العضو الدائر . ويكون I_{12} ، وهو تيار الحمل في هذه الحالة ، في عكس اتجاه I_2 .

نجد جميع الحقائق السابقة مبينة في مخطط المتجهات في شكل (١٨ - ٢) ، الذي يتضح منه أن تيار الحمل I_{12} متقدم على الضغط المتولد V_g . وهذا يعني أن المولد التأثيرى قادر على تغذية الحمل السعوي (Capacitive load) فقط (على أساس التعاقب المرحلي في دائرة العضو الثابت) ، وهذا يرجع إلى طبيعة دائرة العضو الدائر الحثية ، كما سبق أن ذكرنا ، فلا يمكن أن يمر فيها إلا تيار جتى .

الباب الثالث

بعض المشاكل الخاصة بتشغيل المحركات التأثيرية ثلاثية المراحل
(Some problems related to the operation of 3-phase
induction motors)

تنشأ مشاكل متعددة بطبيعة الحال ، عند تشغيل أى جهاز ، لأسباب قد تتعلق بظروف التشغيل ، أو بحكم طبيعة تصميم هذا الجهاز . ونحن لانستطيع حصر جميع المشاكل ، واقتراح الحلول الناجحة لها ، بالنسبة للمحرك التأثيرى ثلاثى المراحل ، وخصوصاً ما يتعلق منها بظروف التشغيل ، التى يمكن أن تختلف باختلاف المكان والزمان . ولكننا نستطيع التركيز على بعض المشاكل ، التى نتوقع أن تثور بناء على خواص معروفة للمحرك ، تنشأ إذا لم نتخذ الاحتياطات المناسبة فى تصميمه ، أو عند تشغيله ، فنحدد العلة ، ثم نقترح لها الدواء . وفيما يلى تفعل ذلك على قدر الإمكان .

(١ - ٣) المشاكل الخاصة بعزم دوران البدء للمحرك :

(Problems related to the starting torque of the motor)

بمراجعة المعادلة (١-٢) نجد أن عزم دوران البدء للمحرك بالنسبة لعزم دوران الحمل الكامل له يتناسب مع $\left(\frac{I_{st}}{I_{fl}} \right)^2$ ، وكذلك مع S_{fl} . فاذا افترضنا أن نسبة تيار البدء فى المحرك إلى تيار الحمل الكامل تتراوح بين ٣ و٥ ، فإن المحرك يمكنه أن يعطى عزم دوران الحمل الكامل إذا كانت قيمه معامل الانزلاق تتراوح ما بين ١١٪ ، ٤٪ على الترتيب . ولا يمكن تصميم المحرك بهذه القيم المرتفعة لمعامل الانزلاق عند الحمل الكامل ، حيث يؤدى ذلك إلى خفض قيمة معامل جودته خفضاً كبيراً ، إلا فى حالة المحركات الصغيرة ذات القفص السنجابى ، التى يمكن أن تصل قيمة معامل الانزلاق فيها عند الحمل الكامل إلى ٥٪ (أقل من خمسة أحصنة) .

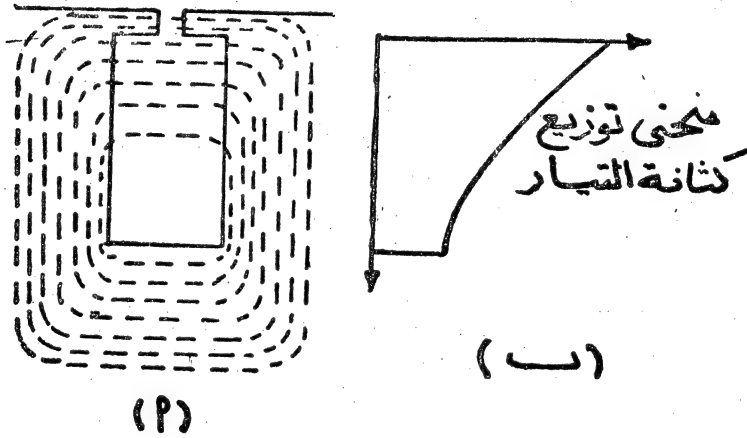
وقد يكون تشغيل المحرك بحيث يدار أولاً بدون حمل ، ثم يزداد الحمل على عمود الإدارة تدريجياً حتى يبلغ حده الكامل ، وفي هذه الحالة لا تتورأية مشاكل من ناحية عزم دوران البدء للمحرك ، حيث لا يحتاج إلا إلى عزم دوران صغير لمواجهة المفقودات ، وهو ما يكون المحرك قادراً على بذله دون الحاجة إلى ترتيبات خاصة في أغلب الأحيان . أما إذا كان من اللازم إدارة المحرك والحمل الكامل موجود على عمود الإدارة ، فلا بد وأن يكون عزم دوران البدء للمحرك أكبر من عزم دوران الحمل الكامل ، بما يساوى مجموع عزمى دوران التعجيل ومواجهة المفقودات ، وهو عزم دوران كبير على أية حال . وبمراجعة شكل منحنى عزم دوران المحرك مع السرعة ، أو معامل الانزلاق ، كما أوردناه في الباب الأول ، نجد أن قيمة عزم دوران البدء للمحرك ($S = 1$ أو $n = 0$) تزداد بزيادة قيمة المقاومة المرحلية ، فى ملفات العضو الدائر ، بالنسبة لقيمة الممانعة الحثية لهذه الملفات ، بحيث أننا نستطيع الحصول على قيمة النهاية العظمى لعزم الدوران للمحرك عند البدء بجعل القيمتين متساويتين . وهذا يعنى أننا نستطيع التحكم فى مقدار عزم دوران البدء للمحرك ، كما نشاء ، بوضع مقاومة ثلاثية المراحل ، متغيرة القيمة فى الحلقات الثانوية للمحرك . وهو ما يحدث بالنسبة للمحرك ذى الحلقات الانزلاقية ، إذا استدعى الحال ، أما بالنسبة للمحرك ذى القفص السنجاني فإن الأمر قد يحتاج إلى ترتيب خاص . لذلك توجد محركات ذات قفص سنجاني من نوع معين توصف بأنها محركات ذات عزم دوران بدء مرتفع (motors with high starting torque) ، نوجز شرح أنواعها فى البندين التاليين .

(٢-٣) المحركات ذات قضبان العضو الدائر العميقة :

(motors with deep rotor bars)

إن الأساس فى هذا الموضوع هو الحصول على ملفات قفص سنجاني ، على العضو الدائر ، مكونة من ذى الحلقات الانزلاقية ، إذا استدعى الحال ، أما بالنسبة للمحرك من قضبان مقفلة ، بحيث تكون مقاومتها كبيرة عند البدء ، لكي تعطى عزم دوران بدء مرتفع ، ثم تقل هذه المقاومة تلقائياً ،

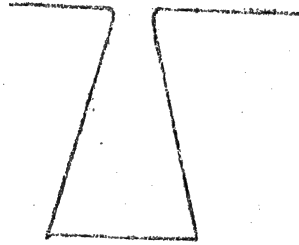
عندما يظهر المحرك دائراً بالحمل الكامل بسرعة قريبة من سرعة التزامن ، بحيث لا يطرأ معامل جودة المحرك ، نتيجة لوجود المقاومة الكبيرة في أثناء وجود تيار الحمل . ونحن نلجأ في هذا الصدد إلى الاستفادة من ناحية معينة تنفرد بها ملفات العنصر الدائر في المحرك ، وهي تغير قيمة ممانعة التسرب المرحلية تغيراً كبيراً جداً ، من X_{20} عند البدء من السكون إلى $SX_{20} = X_{2s}$ عند الحمل الكامل بمعامل الإنزلاق s ، وذلك بسبب تغير التردد بالنسبة للعضو الدائر من f_1 إلى $sf_1 = f_{2s}$ عند نفس معامل الإنزلاق s . إن ممانعة التسرب هذه تنشأ عن وجود خطوط قوى مغناطيسية متسربة تحيط بالملفات الثانوية ، ولا تتشابه مع الملفات الابتدائية (صفحة ٣١ كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربائية) ، وبين شكل (١ - ٣) مسار هذه الخطوط في جزء (الملفات) وهو قضيب في هذه الحالة) الواقع في الجرى . ويمكننا القول بأن إرتفاع قيمة التردد في البدء



شكل (١ - ٣) ب ، ١

يمكن أن يؤخذ في الحسبان ، لإعطاء ممانعة تسرب مكافئة عالية ، بزيادة عدد خطوط القوى المتسربة المتشابهة مع الأجزاء السفلى من المقطع ، كما في شكل (١ - ٣) ، وأن إنخفاض قيمة التردد عند الحمل الكامل ينعكس على قيمة ممانعة التسرب المنخفضة ، بخفض عدد الخطوط المتسربة .

وهذا يعنى أننا نلجأ إلى الإستفادة من الظاهرة القشرية (skin effect) ،
التي تصاحب زيادة التردد عند البدء ، بأن نقرر أن التيار المرحلي في الملفات
الثانوية سوف يضطر إلى المرور عبر الأجزاء العليا من مساحة مقطع القضبان
المكونة لهذه الملفات عند البدء ، وزيادة كثافة التيار فيها عن الأجزاء السفلى ،
شكل (١ - ٣) ب ، مما يؤدي إلى زيادة قيمة المقاومة المرحلية المكافئة لهذه
لهذه القضبان . ثم يمكن لهذا التيار نفسه أن يمر عبر المساحة كلها عندما
ينخفض التردد في حالة الحمل الكامل ، بحيث تنخفض قيمة المقاومة المرحلية
المكافئة للقضبان انخفاضاً ملحوظاً . فاذا عمدنا إلى تقليل مساحة الأجزاء العليا
من مقطع القضبان كما في شكل (٢ - ٣) ، مع زيادة عمق القضيب ، لنفس



شكل (٢ - ٣)

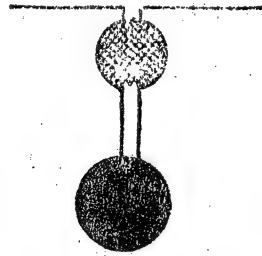
الغرض المطلوب ، فإننا نحصل على مقاومة مرحلية مكافئة للقضبان تزيد
زيادة ملحوظة في البدء عنها عند الحمل الكامل .

وتوصف مثل هذه المحركات بأنها ذات قضبان عضو دائر عميقة ، ثم
ذات عزم دوران بدء مرتفع بناء على ذلك . ونجد في الحياة العملية أشكالاً
مختلفة لهذه القضبان وصناعات متباينة تقوم على نفس الأساس لإستيفاء الغرض
المطلوب .

(٣ - ٣) المحركات مزدوجة القفص السنجاني :

(Double squirrel cage motors)

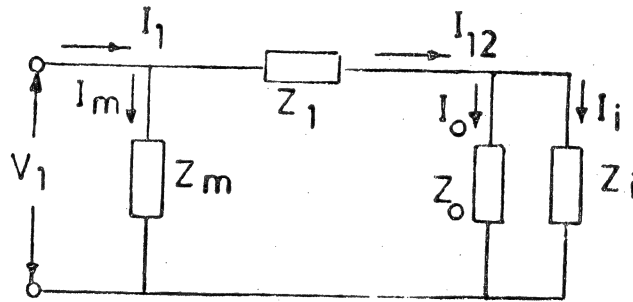
تزود بعض المحركات بقفص سنجاني مزدوج على العضو الدائر، أحدهما (الخارجي) ذو مقاومة مرحلية مكافئة للقفصان مرتفعة القيمة، والثاني (الداخلي) ذو مقاومة مرحلية مكافئة للقفصان منخفضة القيمة بالنسبة للأول، ويعتمد هذا أساساً على جمل القفصان في القفص الخارجي ذات مقطع مساحته أقل بصورة ملحوظة من مقطع القفصان في القفص الداخلي ، كما يتبين من شكل (٣ - ٣) .



شكل (٣ - ٣)

ومن ناحية أخرى يستفاد من الظاهرة القشرية، بنفس الطريقة التي استفدنا بها في الحالة السابقة ، للحصول على ممانعة تسرب حثية كبيرة ، للقفص الداخلي عند البدء ، تتجاوز قيمتها كثيراً قيمة مقاومة البدء المرتفعة للقفص الخارجي ، بحيث تصبح قيمة معاوقة القفص الداخلي كبيرة بالنسبة لقيمة معاوقة القفص الخارجي ، فيمر الجزء الأكبر من تيار البدء في القفص الخارجي ، ونحصل على عزم دوران بدء كلي مرتفع للمحرك . أما عند الحمل الكامل ، وقد انخفض معامل الانزلاق بدرجة كبيرة عما كان عليه في البدء ، فإن قيمة ممانعة التسرب للقفص الداخلي تتضاءل بالنسبة لقيمة المقاومة المرحلية للقفص

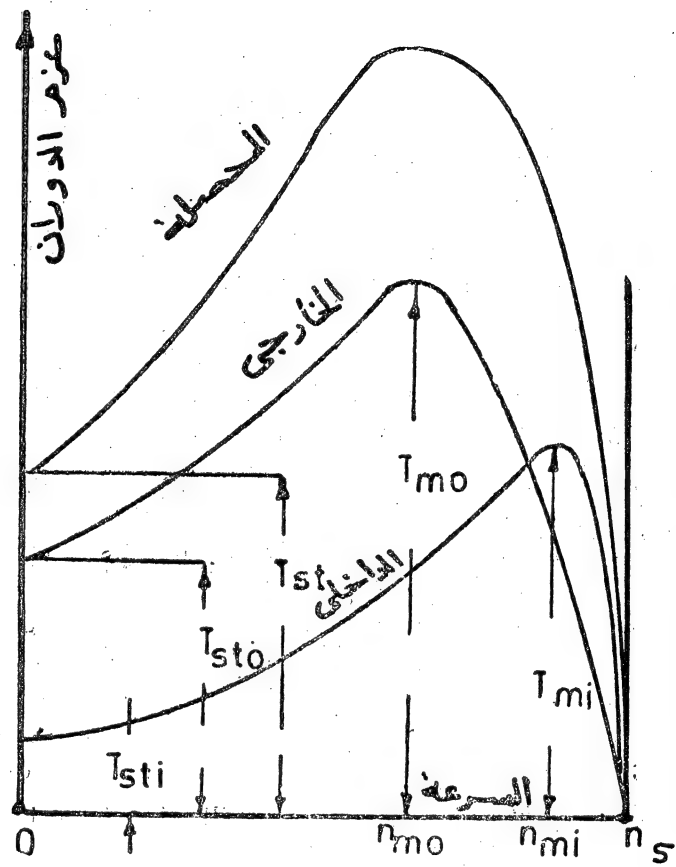
الخارجى ، فتصبح قيمة معاوقة القفص الخارجى مرتفعة بالنسبة لقيمة معاوقة القفص الداخلى ، مما يدفع بمرور الجزء الأكبر من التيار فى القفص الداخلى ذى المقاومة المرحلية المكافئة المنخفضة ، فلا يتأثر معامل جودة المحرك تأثراً ملحوظاً بوجود القفص الخارجى ، الذى يساعد على إعطاء عزم دوران بدء مرتفع للمحرك . وفى الواقع أنه يمكننا ، على هذا الأساس ، اعتبار القفصين مكافئين لدائرتى ملفات متصلين مرحلياً على التوازي ، وينقسم بينهما



(٣ - ٤)

شكل (٣ - ٤)

التيار الثانوي المرحلى بنسبة عكسية لقيمتى معاوقتهما ، ويكون عزم الدوران الكلى للمحرك عبارة عن مجموع عزمي الدوران الذى يعطيه كل قفص على حدة . فإذا فرضنا أن معاوقه القفص الخارجى المرحلية المكافئة فى حالة السكون هى $Z_o = R_o + jX_o$ ، ومعاوقه القفص الداخلى المرحلية المكافئة فى حالة السكون أيضاً هى $Z_i = R_i + jX_i$ ، منسوبتان إلى الملفات الابتدائية ، ومعاوقه الملفات الابتدائية المرحلية هى $Z_1 = R_1 + jX_1$ ، فإننا نحصل على دائرة مرحلية مكافئة تقريبية للمحرك عند أى معامل إنزلاق s ، منسوبة إلى الملفات الابتدائية ، كما هو مبين فى شكل (٣ - ٤) . فإذا أخذنا بقاعدة التجميع (superposition)



(٣ - ٥)

شكل (٣ - ٥)

(theorem) ، في هذه الحالة ، فاننا نستطيع التعامل مع كل قفص على إفراد ، على انه ملفات ثانوية قائمة بذاتها لنفس الملفات الابتدائية ، وفي كل مرة نحصل على منحنى عزم دوران مع معامل الإنزلاق مستقل ، تتوقف قيمة النهاية العظمى وموقعها فيه ، وعزم دوران البدء له ، على قيمتي ممانعة التسرب المرحلية والمقاومة المرحلية ، والنسبة بينهما ، كما سبق بيانه في الباب

الأول . ثم نحصل على منحني عزم الدوران الكلي للمحرك ، مع معامل الإنزلاق ، بتجميع عزمي الدوران للقفصين معاً ، عند معامل الإنزلاق ، كما هو مبين في شكل (٥ - ٣) . ويلاحظ أن إختلاف قيمتي النهاية العظمى في منحني عزم الدوران للقفصين ، وتباين موقعهما ، هو الذي يعطى المحرك الخاصية المطلوبة ، وهي إعطاء عزم دوران بدء مرتفع . وعلى حسب ثوابت القفصين المفروضة ، وما سبق بيانه في الباب الأول ، نجد أن النسبة

$$\alpha_i = \frac{R_i}{X_i} \text{ تساوى معامل الإنزلاق } S_{mi} \text{ الذي يحدد قيمة النهاية العظمى}$$

لعزم الدوران في القفص الداخلي ، وأن النسبة $\alpha_o = \frac{R_o}{X_o}$ تساوى معامل الإنزلاق S_{mo} الذي تقع عنده النهاية العظمى لعزم الدوران في القفص الخارجى ، وهما مختلفان إختلافاً واضحاً . كما أننا نتوقع أن تكون النسبة بين قيمتي النهاية العظمى لعزمي الدوران في القفصين الداخلي والخارجي T_{mi}/T_{mo} هي نسبة عكسية لممانعتي تسربها X_o/X_i .

a 3-phase; 6 pole double cage induction motor, for 220 V in delta connection, 50 HZ has at standstill the following roto impedances referred to stator : inner cage (4 + 50 j) ohms, and outer cage (8 + 25 j) ohms. Neglecting the impedance of the stator winding, find the ratio of the starting torque to the full load torque at 3% slip .

يبين شكل (٥-٣) الدائرة المكافئة لمثل هذا المحرك ويكون في حالتنا هذه:

$$R_o = 8 , X_o = 25 , R_i = 4 , X_i = 50 \text{ ohms ,}$$

$$n_s = \frac{50 \times 60}{3} = 1000 \text{ r.p.m.}$$

عند بدء الحركة من السكون ، أى عند $S = 1$ ، ومع إهمال معاوقة العضو
الثابت ، نجد أن :

تيار البدء في القفص الخارجى :

$$I_{ost} = \frac{220}{\sqrt{8^2 + 25^2}} = 8.36 \text{ A}$$

قدرة الثغرة الهوائية للقفص الخارجى :

$$P_{gst} = 3 I_o^2 \frac{R_o}{S} = 3 \times (8.36)^2 \times 8 = 1680 \text{ W}$$

تيار البدء في القفص الداخلى :

$$I_{ist} = \frac{220}{\sqrt{4^2 + 50^2}} = 4.38 \text{ A}$$

قدرة الثغرة الهوائية للقفص الداخلى :

$$P_{gist} = I_i^2 \frac{R_i}{S} = 3 \times (4.38)^2 \times 4 = 231 \text{ W}$$

قدرة الثغرة الهوائية للقفصين معا عند البدء هى مجموع القدرتين أى أن :

$$P_{gst} = 1680 + 231 = 1911 \text{ W}$$

ويكون عزم دوران البدء للمحرك هو :

$$T_{st} = \frac{P_{gst}}{2 \pi \frac{n_s}{60} \times 9.81} = 0.973 \frac{P_{gst}}{n_s}$$

$$= 0.973 \times \frac{1191}{1000} = 1.86 \text{ Kg.m}$$

ويساهم القفص الخارجى فى هذه القيمة بما يساوى

$$\left(0.973 \times \frac{1680}{1000} = \right) 1.63 \text{ Kg.m.}$$

كما يساهم القفص الداخلى فى هذه القيمة بما يساوى

$$\left(0.973 \times \frac{231}{1000} = \right) 0.22 \text{ Kg.m}$$

وبلاحظ أن ارتفاع قيمة عزم دوران البدء ، الذى يعطيه القفص الخارجى ، إرتفاعا ملحوظا عن ذلك الذى يعطيه القفص الداخلى فى عزم دوران البدء الكلى ، ناشئ عن مؤثرين يعملان فى آن واحد ، وهما إرتفاع قيمة معاوقه القفص الداخلى بالنسبة للقفص الخارجى عند البدء ، ثم زيادة النسبة بين قيمتى ممانعة التسرب والمقاومة المرحلية فى القفص الداخلى عنها فى القفص الخارجى ، بسبب إرتفاع قيمة المقاومة وإنخفاض قيمة الممانعة فى هذا الأخير زيادة ملحوظة عند البدء

عند معادن الإزلاق $s = 0.03$ ، أى عند الحمل الكامل تقريبا نجد أن

تيار الحمل فى القفص الخارجى

$$I_{ol} = \frac{220}{\sqrt{25^2 + \left(\frac{8}{0.03}\right)^2}} = 0.824 \text{ A}$$

قدرة الفغرة الهوائية للقفص الخارجى .

$$P_{gol} = 3I_{ol}^2 \frac{R_c}{S} = 3 \times (0.824)^2 \times \frac{8}{0.03} = 542 \text{ W}$$

تيار الحمل في القفص الداخلي :

$$I_{ii} = \frac{220}{\sqrt{50^2 + \left(\frac{4}{0.03}\right)^2}} = 1.514 \text{ Amps}$$

قدرة الثغرة الهوائية للقفص الداخلي :

$$P_{gi} = 3 I_{ii}^2 \frac{R_i}{S} = 3 \times (1.514)^2 \times \frac{4}{0.03} = 952 \text{ W}$$

قدرة الثغرة الهوائية للقفصين معا عند الحمل الكامل :

$$P_{gi} = 542 + 952 = 1494 \text{ W}$$

ويكون عزم الحمل الكامل للمحرك هو :

$$T_i = 0.973 \frac{P_{gi}}{n_s} = 0.973 \times \frac{1494}{1000} = 1.456 \text{ Kg.m.}$$

النسبة المطلوبة :

$$\frac{T_{st}}{T_i} = \frac{1.86}{1.456} = 1.28$$

وهذا يعطي الفرصة لبدء المحرك والحمل الكامل موجود على عمود الإدارة

(٣-٤) ظاهرة الحبو : Crawling phenomena

سبق أن بينا في الباب الثالث من كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربائية، في البند الخاص بالتوافقيات الفراغية للمفات المنتج (صفحة ١٠٨-١١٧)، أنه بالنسبة للتوافقيات الفراغية في منحنى التوزيع الفراغي (أو المنحنى

الفراغى) للقوة الدافعة المغناطيسية للملفات المنتج ثلاثية المراحل ، عندما تمر فيها تيارات ثلاثية المراحل ، كما هو الحال بالنسبة للملفات الابتدائية للمحرك التأثيرى ثلاثى المراحل ، يكون الوضع على النحو التالى:

ا — توجد توافقية فراغية أساسية واحدة فقط ، وهى توافقية أمامية تدور بسرعة التزامن n_s فى اتجاه دوران العضو الدائر ، وهذا هو المجال المغناطيسى الدائر الذى بنينا كل النظريات الأساسية للمحرك على أساس تواجده بتأثيراته المختلفة .

ب — توجد توافقيات عالية أمامية درجاتها $(6m + 1)$ ، حيث m عدد صحيح موجب ، وهى تدور جميعا فى اتجاه دوران العضو الدائر بالسرعات $\frac{n_s}{6m + 1}$ ، وتمثل كل منها مجالا مغناطيسيا دائريا يمكن أن يعطى تأثيرات مماثلة لتلك التى يعطيها المجال المغناطيسى الدائر الأساسى ، ولكن هذه التأثيرات تتفاوت من مجال إلى آخر على حسب الإتساع .

ج — توجد توافقيات عالية خلفية درجاتها $(6m - 1)$ تدور فى عكس اتجاه العضو الدائر بالسرعات $\frac{n_s}{6m - 1}$

وجميع هذه التوافقيات تمثلها المعادلة (١٠ - ٣) فى الكتاب المذكور ، وهى:

$$Y = f(\psi) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{T_{ph}}{P} I \sum_{\lambda = 1, 3, 5, \dots, 13, 15, \dots} \pm \frac{k_w \lambda}{\lambda} \cos \left(\omega t \pm \lambda \frac{\pi x}{\tau_p} \right) \quad (3-1)$$

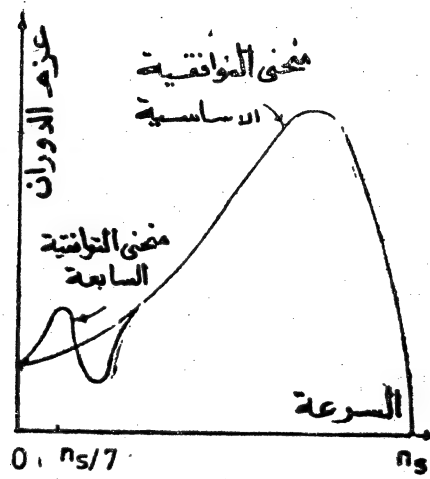
يمكن لكل توافقية عالية أمامية درجاتها $(6m + 1)$ ، حيث m عدد صحيح موجب ، أن تعطى للمحرك عزم دوران يشبه فى منحناه ومنحنى عزم

الدوران الأساسي للمحرك مع معامل الإنزلاق ، ويختلف هذا المنحنى عن المنحنى الأصلي في حجمه فقط ، حيث تكون قيمة النهاية العظمى له أصغر من قيمة النهاية العظمى لعزم الدوران الأصلي ، بما يتناسب مع صغر اتساع التوافقية العالية . كما أن هذا المنحنى المماثل بأكمله يشغل مسافة تتناسب مع $\frac{n_s}{m}$ على محور

السرعة (أو معامل الإنزلاق) ، نظرا لأن سرعة المجال المؤثر هي $\frac{n_s}{m}$ بدلا

من n_s في المجال الأساسي . ونحصل على منحنى عزم الدوران الفعلي للمحرك مع معامل الإنزلاق بتجميع عزوم الدوران الناشئة عن تأثير المجال المغناطيسي للتوافقية الأساسية ، وتأثيرات المجالات المغناطيسية للتوافقيات العالية عند قيم معامل الإنزلاق المختلفة . ونظرا لأن اتساع التوافقيات العالية ، وبالتالي تأثيرات المجالات الناشئة عنها ، تقل بشكل ملحوظ كلما ارتفعت درجتها ، على حسب المعادلة (١ - ٣) ، فإننا نستطيع أن نهمل تأثير جميع التوافقيات العالية ، فيما عدا التوافقية التي درجتها (١ + 6 m) ، بأخذ m أصغر ما يمكن أي $m = 1$ ، وهي التوافقية السابعة . وفي هذه الحالة نحصل على منحنى عزم دوران كلي للمحرك ، ناشيء عن تأثير كل من مجال التوافقية الأساسية ومجال التوافقية السابعة معا ، كما هو مبين في شكل (٦ - ٣) .

يلاحظ أن تجميع عزوم دوران التوافقية السابعة على عزم دوران التوافقية الأساسية يعطى منحنى عزم الدوران المحصل خاصية الإيزان عند سرعة قريبة من $\frac{n_s}{7}$ ، إلى جانب الإيزان الموجود أصلا عند سرعات أقل قليلا من n_s كما سبق شرحه في الباب الأول . وقد يؤدي وجود حمل على عمود الإدارة في هذه الحالة إلى جعل المحرك يدور عند السرعة المنخفضة $\frac{n_s}{7}$ تقريبا ، حيث يمكن أن يصبح عزم الدوران المحرك وعزم دوران الحمل في حالة إيزان ديناميكي . ويطلق على هذه الظاهرة اسم ظاهرة الحبو ، ويمكن



(شكل ٦ - ٣)

القضاء عليها بالتخلص من التوافقية الفراغية السابعة ، وذلك يجعل المعامل
الوترى لها يساوى صفراً ، عن طريق جعل الملفات كسرية الخطوة باتساع
مقداره $\frac{6}{7}$ من الخطوة القطبية ، كما سبق شرحه في الباب الثاني من كتاب
نظريات وتصميم الآلات الكهربائية (صفحة ٥٨ - ٦٠)

(٣ - ٥) ظاهرة التماسك : (Cogging)

عندما يكون عدد مجاري العضو الثابت S_1 مساوياً لعدد مجاري العضو
الدائر S_2 تحدث ظاهرة التماسك ، حيث يتمتع المحرك عن بدء الدوران على
الإطلاق . وعلاج هذه الحالة يكون بطبيعة الحال بجعل S_1 لا يساوى S_2 بأية
حال من الأحوال ، كما سيتم بيانه في باب التصميم .

(٣ - ٦) إصدار الضجة : Noise production

يحدث في بعض الأحيان، عندما يكون المحرك دائراً بسرعة أقل من سرعته

المعتادة ، أن تنشأ في الحديد اهتزازات زائدة تصدر عنها ضجة تشبه عواء متوسط الدرجة .

وظواهر الحبو والتماسك والضجيج من خصائص محركات القفص السنجابي دون غيره . والسبب الأساسي في تميزه بهذه الخصائص عن محركات الحلقات الإنزلاقية ، أن القفص السنجابي يمكن أن تمر فيه تيارات بفعل أى توافقية من توافقيات المجال المغناطيسى في الثغرة الهوائية ، بينما تعمل ملفات العضو الدائر في المحرك ذى الحلقات الإنزلاقية على تقليل تأثير أية توافقية من هذه التوافقيات التي يختلف طول خطوتها عن خطوة الملف ، أى أية توافقية غير الاساسية .

والحقيقة أن هذه الظواهر لا يمكن تفسير أسبابها بشكل حاسم ودقيق ، وهى تعزى عادة لأشكال مختلفة من توافقيات المجال المغناطيسى المتولدة بطريقة طفيلية (parasitic harmonic magnetic fields) ، مثل :

(١) توافقيات المجال التى تنشأ عن الملفات ، وتوافقيات المجارى (slot harmonics) ، وتموجات الاسنان (tooth ripples) (راجع كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية صفحة ٧٩) .

(ب) التوافقيات الناشئة عن التشيع المغناطيسى ، وتلك التى يسببها عدم انتظام طول الثغرة الهوائية للملفات .

(ج) التوافقيات وعدم التماثل في ضغط الينبوع ، وكذلك المجال المتسرب عن التوصيلات الطرفية للملفات . هذا ، وتسبب هذه المجالات المغناطيسية الطفيلية في عمل تعديلات شكلية في أجزاء المحرك الميكانيكية ، مثل انحناء عمود الادارة (راجع جزء التوافقيات صفحة ٦٩ كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية)

تشغيل المحرك التأثري ثلاثى المراحل على تردد يختلف عن تردده الأصلي :

إن الترددین الشائع استخدامهما بالنسبة لينابيع القوى فى العالم بأسره ، هما ٦٠ و ٥٠ ذبذبة فى الثانية ، فتستخدم ٥٠ ذبذبة عموما فى أوروبا و ٦٠ ذبذبة عموما فى أمريكا . وقد تستخدم المحركات المصنوعة فى أوروبا فى بعض البلدان التى يشيع فيها استخدام التردد ٦٠ ذبذبة فى الثانية ، كما قد تستخدم المحركات الأمريكية حيث يشيع استخدام التردد ٥٠ ذبذبة فى الثانية . ويجب فى كلتا الحالتين اتخاذ الاحتياطات اللازمة لكى لا يضار المحرك بسبب تغيير التردد الذى صنع له ، وسنبين ذلك فيما يلى بالنسبة لكل حالة على حدة .

(أولا) بالنسبة للمحركات التى تصمم على أساس تردد ٦٠ ذبذبة فى الثانية وتستخدم على تردد ٥٠ ذبذبة فى الثانية : وهذه الحالة أبسط بكثير من الحالة الأخرى ، فمراجعة معادلة القوة الدافعة الكهربية المرحلية E_1 التى تتولد فى ملفات المنتج، نجد أنها تتوقف على كل من التردد f_1 والفيض المغناطيسى المتبادل ϕ_m على النحو التالى :

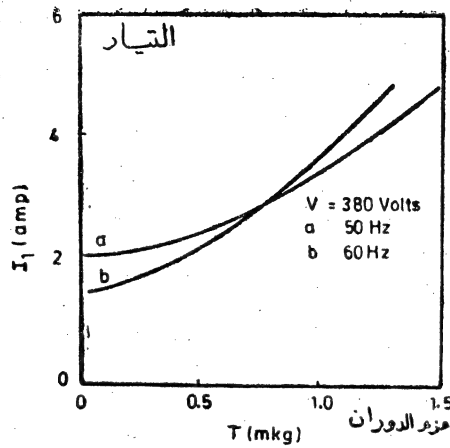
$$E_1 = 4.44 f_1 \phi_m N_1 k_{o1} \times 10^{-8} \text{ volts}$$

فإذا اعتبرنا أن ضغط الينبوع V_1 يساوى بالتقريب E_1 ، وهو ثابت القيمة ، فإن استخدام التردد ٥٠ ذبذبة فى الثانية بدلا من ٦٠ ذبذبة فى الثانية يستلزم خفض ضغط الينبوع بنسبة ٥٠ إلى ٦٠ حتى لا ترتفع قيمة ϕ_m بما يعوض مقدار النقص الناشئ فى التردد إذا ظلت قيمة V_1 بدون تغيير . لذلك نجد أن المحركات المصنوعة فى أمريكا على أساس تردد ٦٠ ذبذبة فى الثانية وضغط ١١٥ فولت ينصح صانعها بخفض الضغط إلى ١٠٠ فولت عند استخدامها على تردد ٥٠ ذبذبة مع الاطمئنان إلى سلامة تشغيلها على هذا النحو . ويحتاج الأمر فى هذه الحالة إلى استخدام محول ذاتى (auto transformer) معد خصيصا لهذا الغرض . وقد تصبح المشكلة محلولة تلقائيا -

في الأماكن النائبة، عندما يكون هناك هبوط كبير لأمفر منه في ضغط الينبوع نتيجة لبعء المحرك عن مركز التوزيع .

(ثانيا) بالنسبة للمحركات التي تصمم على أساس ٥٠ ذبذبة في الثانية وتستخدم على تردد ٦٠ ذبذبة في الثانية : هذه هي الحالة الأصعب التي يحتاج علاجها إلى مجهود ملحوظ . وقد قام المؤلف بالاشتراك مع آخرين * بإجراء بعض التجارب العملية واستخلاص بعض الحقائق المفيدة بالنسبة لهذه الحالة .

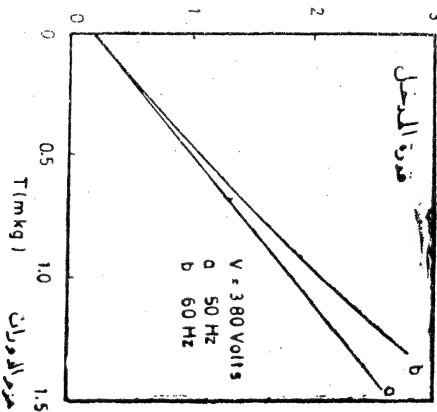
والمحرك الذي أجريت عليه التجارب يمتلك المواصفات الآتية : ذو قفص سنجاني ، ثلاثي المراحل ، ٥٠ ذبذبة في الثانية ، ١٥ كيلو وات ، ٣٨٠/٢٢٠ فولت ، دلنا / نجمة ٣٥/٦١ أمبير ، ١٣٨٠ لفة في الدقيقة ، معامل القدرة ٠.٧٩ ، عزم دوران الحمل الكامل ١٠.٥٦ كيلو جرام متر ، مقاومة ملفات العضو الثابت المرحلية ٣.٠ أوم ، مقاومة ملفات العضو الدائر المرحلية منسوبة إلى العضو الثابت ٢.٥ أوم . وقد تمت تغذية المحرك على التردد ٥٠ ، ٦٠ ذبذبة في الثانية من مولد متزامن بالضغط المناسب في كل حالة . هذا وقد أمكن تحميل المحرك على حسب الطلب ، بإحدى وسيلتين : مولد تيار مستمر يعطى قدرة المخرج لمقاومة متغيرة ، أو فرملة تيارات اعصارية ، وفي كلتا الحالتين أمكن ضبط قيم مختلفة لعزم دوران الحمل على المحرك وقياس تيارات الينبوع المناظرة ، ثم حساب قدرة المدخل ومعامل القدرة ومعامل الجودة مع كل من التردد ٥٠ ، ٦٠ ذبذبة في الثانية ، وعند الضغط المقنن ٣٨٠ فولت . وتبين الأشكال من (٧ - ٣) إلى (١١ - ٣) المنحنيات المرسومة بالنتائج التي تم الحصول عليها . وبمراجعة هذه المنحنيات تتضح الحقائق الآتية :



(شكل ٧-٣)

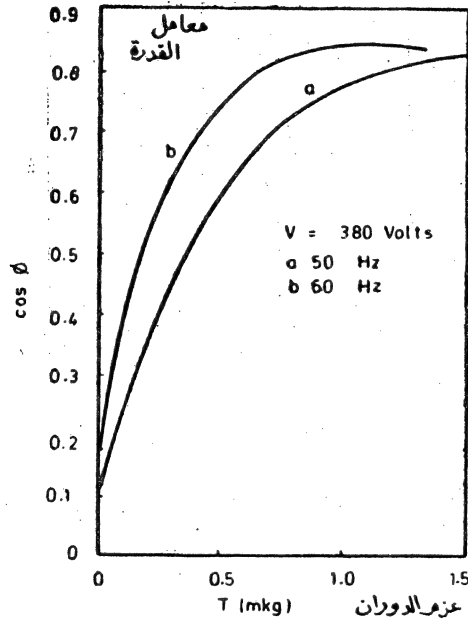
١ — يبين شكل (٧-٣) أن زيادة تردد التشغيل للمحرك إلى ٦٠ ذبذبة في الثانية يؤدي إلى انخفاض ملحوظ في قيمة تيار المدخل للمحرك عند الاحمال الصغيرة، بحيث ترتفع قيمة التيار بعد ذلك حتى تصبح مساوية لقيمة التيار المأخوذ مع التردد ٥٠ ذبذبة، ثم تزيد عنها بعد أن يتعدى الحمل على المحرك ٦٥٪ من قيمة الحمل الكامل.

٢ (يبين شكل (٨-٣) أن زيادة التردد إلى ٦٠ ذبذبة في الثانية تؤدي



(شكل ٨-٣)

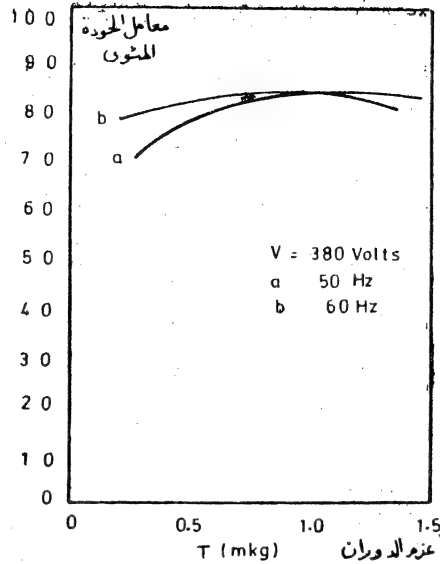
إلى زيادة في قدرة المدخل للمحرك ، ويرتفع مقدار الزيادة كلما ازداد عزم دوران الحمل على المحرك ، كما يبين شكل (٩ - ٣) كيف يزداد معامل القدرة أيضا في هذه الحالة .



(شكل ٩ - ٣)

٣) يزداد معامل الجودة عند الاحمال الصغيرة ، ويقل عند الاحمال التي تقرب من الحمل الكامل ، وذلك عند زيادة التردد إلى ٦٠ ذبذبة في الثانية ، كما يتضح من شكل (١٠ - ٣) .

ويمكن تفسير هذه الظواهر على هدى علاقتين أساسيتين خاصتين بنظرية تشغيل المحرك ، وهما (١) أن الضغط المرحلي V الذي يعمل عليه المحرك يتناسب تقريبا مع حاصل الضرب $f \times B$ أى التردد فى كثافة الخطوط المغناطيسية فى الثغرة الهوائية B ، وهو ما سبق ذكره والاستناد إليه عند



(شكل ١٠ - ٣)

شرح علاج الحالة الأولى ، و ب) أن عزم الدوران T الذى يعطيه المحرك يتناسب مع حاصل ضرب المركبة الفعالة لتيار المحرك I_a وكثافة الخطوط المغناطيسية B ، وذلك مع اعتبار أن جميع المؤثرات الأخرى ثابتة القيمة. ونظرا لأن حاصل الضرب $B \times f$ يساوى مقدارا ثابتا (يتناسب مع قيمة الضغط الثابت V) فإن T تتناسب مع $\frac{I_a}{f}$. وهذا يعنى أنه عندما تنخفض قيمة B ، نتيجة لإزدياد التردد ، مع ثبوت قيمة عزم الدوران ، فإن قيمة I_a سوف تزداد تبعا لذلك . وفيما يلى بعض التحليلات الخاصة بالتأثيرات المختلفة لتغيير التردد على خواص المحرك .

تأثير تغيير التردد على تيار المحرك : يتكون تيار اللاحمل I_0 فى المحرك من تيار المغطسة I_m ، الذى تتوقف قيمته على قيمة B ، وتيار المفقودات I_1 ، الذى تتوقف قيمته على المفقودات الميكانيكية ومفقودات الحديد . وتزداد قيمة المفقودات الميكانيكية بعض الشيء نتيجة

لازدياد السرعة . أما مفقودات الحديد فإنها تتكون من مفقودات التيارات الاعصارية التي تتوقف على $B^2 f^3$ ، والتي تظل ثابتة القيمة مادام الضغط V لم يتغير ، وكذلك من مفقودات التخلف المغناطيسي W_h التي تتناسب مع $f B^{1.6}$ على حسب علاقة شتينمير (كتاب هندسة الآلات الكهربائية صفحة ٩٢) أى أن .

$$W_H < f B^{1.6} < \frac{f^{1.6} B^{1.6}}{f^{0.6}} < \frac{V^{1.6}}{f^{0.6}}$$

وهذا يعنى أن مفقودات التخلف المغناطيسى (hysteresis losses) تقل بازدياد التردد مادامت قيمة الضغط V تظل ثابتة . ونظراً لأن المفقودات الميكانيكية تزداد بازدياد التردد ، فلا يمكننا أن نتنبأ بما يحدث للمركبة I_1 بالضبط نتيجة لإزدياد التردد ، ولكن نظراً لأن قيمة I_1 تكون صغيرة بالنسبة لقيمة I_0 ، التي تقل بازدياد التردد عندما تقل قيمة B ، فإنه يمكن إجمال القول بأن تيار الحمل I_0 يقل نتيجة لإزدياد قيمة التردد (مع ثبوت قيمة الضغط V) ، وهذا ما تحقق عملياً معاً ، وسبقت ملاحظته فى شكل (٧-٣) .

عند تحميل المحرك فإنه يسحب من الشبكة التيار الفعال I_a ، إلى جانب تيار اللامحمل I_0 ، الذى نعتبر أنه يظل ثابتاً تقريباً لإنشاء المجال المغناطيسى، وتعويض المفقودات الميكانيكية ومفقودات الحديد . ونظراً لأن قيمة عزم

دوران الحمل T تتناسب مع $\frac{I_a}{f}$ ، كما سبق ذكره ، فإن تشغيل المحرك على نفس الضغط وعند نفس عزم دوران الحمل يؤدى إلى زيادة قيمة I_a بازدياد قيمة التردد . وعند تشغيل المحرك على ٥٠ ذبذبة بدلا ٦٠ مع نفس ضغط الشبكة يتم التوازن بين مقدار النقص الناشئ فى تيار المحرك نتيجة لانخفاض قيمة المركبة I_0 ومقدار الزيادة الناشئة نتيجة لارتفاع قيمة المركبة I_a عند حمل جزئى معين ، بحيث يسحب المحرك عند هذا الحمل نفس قيمة التيار مع كل من التردد ٥٠ ، ٦٠ ذبذبة فى الثانية (حوالى ٦٥٪ من الحمل الكلى

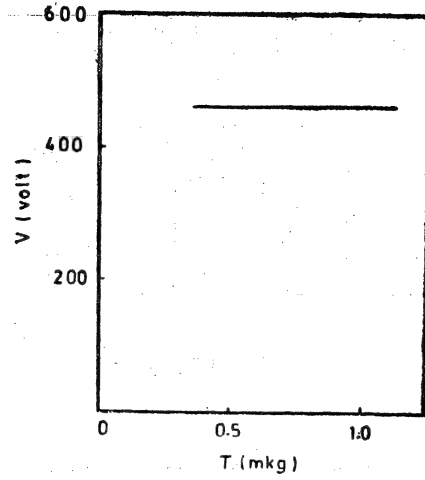
بالنسبة للمحرك المختبر) . وعندما يزداد الحمل على المحرك بعد ذلك، فإن تأثير إرتفاع قيمة المركبة I_a يكون متغلباً ، مما يؤدي إلى زيادة في قيمة تيار المحرك نتيجة لزيادة التردد، كما هو واضح في شكل (٧-٣) . هذا ويمكننا أن نخرج من هذه التحليلات بنتيجة هامة ، وهو أنه يمكن تشغيل المحرك على نفس الضغط V مع ، زيادة قيمة التردد من ٥٠ إلى ٦٠ ذبذبة في الثانية، حتى حوالي ٦٦ ٪ من الحمل الكلى بدون إتخاذ أية إجراءات إضافية ، كما أننا نحصل في الغالب على خواص أفضل في هذه الحالة .

تأثير تغيير التردد على معامل القدرة وقدرة المدخل : يؤدي إنخفاض قيمة مركبة اللاحمل I_o في تيار المحرك، وإرتفاع قيمة المركبة الفعالة I_a فيه، إلى زيادة في قيمة معامل القدرة بالضرورة . ويختلف مقدار التحسن في معامل القدرة عند الاحمال المختلفة بطبيعة الحال . هذا ومن الواضح أن زيادة السرعة نتيجة لزيادة التردد تستلزم زيادة قدرة المدخل للمحرك عند عزم دوران الحمل

$$\left(T = \frac{P}{\omega} \right) T$$

تأثير ضغط الينبوع على خواص المحرك ذي تردد ٥٠ ذبذبة في الثانية :

يتبين لنا من المناقشات السابقة أن تشغيل المحرك على تردد ٦٠ ذبذبة في الثانية بدلاً من ٥٠ يؤدي عموماً إلى نقص في قيمة كثافة الخطوط المغناطيسية في الثغرة الهوائية B . وينشأ عن ذلك أن يسحب المحرك تياراً من الينبوع يختلف عن التيار الذي يسحبه عند ٥٠ ذبذبة في الثانية ، إذا استخدم نفس الضغط المقنن V في الحالتين . ولاشك أن رفع قيمة الضغط V عند استخدام تردد ٦٠ ذبذبة سوف يعمل على رفع قيمة B وبالتالي إستعادة قيم التيار التي يسحبها المحرك عند إستخدام التردد الأصلي ٥٠ ذبذبة في الثانية . ولاشك أن مدى الإقتراب من منحنيات خواص المحرك الأصلية ، مع إستخدام التردد المختلف ، يتوقف على مقدار الزيادة في الضغط المستعمل عن الضغط المقنن ،



شكل (١١-٣)

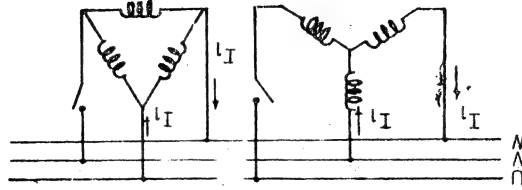
ولكننا لا نستطيع عموماً أن نزيد الضغط عن ٢٠٪ من مقننه دون أن يتعرض المحرك لبعض المخاطر الخاصة بالهزل . هذا ويمكن الاستعاضة عن الزيادة في ضغط الينبوع بحقن المحرك في الملفات الثانوية بالضغط المناسب ، من ناحية القيمة والاتفاق المرحلي مع ضغط الينبوع ، وينصب ذلك بطبيعة الحال على الحركات ذات الحلقات الإنزلاقية فقط

تشغيل المحرك التآثيرى ثلاثى المراحل على خطين عند إنقصال الخط الثالث

لسبب طارىء :

عندما يحدث عطل طارىء في أحد الخطوط الثلاثة المغذية لمحرك تأثيرى ثلاثى المراحل ، ويتم فصل هذا الخط باى شكل من الأشكال ، يصبح المحرك عاملاً على خطين فقط ، يقومان بتغذية مرحلتين من ملفات المحرك موصلتين على التوالي ، إذا كان المحرك موصلاً بنجمة ، أو تغذية مرحلتين متواليتين

موصلتين على التوازي مع المرحلة الثالثة ، إذا كان المحرك موصلا دلتا ، كما في شكل (١٢ - ٣) . وفي كلتا الحالتين يصبح المحرك مكافئا لمحرك



شكل (١٢ - ٣)

تأثيرى احادى المرحلة يتغذى بالضغط الخطى للينبوع . وإن أهم ما يعيننا فى هذه الحالة أمرين :

(أولا) هل المحرك فى الصورة الجديدة فى حالة اتزان ، بحيث يمكن أن يتابع أداء الحمل على أى وجه من الوجوه و (ثانيا) ما هى الاحتمالات اللازم اتخاذها لكي لا يضار المحرك من متابعة أداء الحمل على نحو معين .

إن مناقشة الموضوع على هذا النحو يستبعد فصل المحرك عن الينبوع تماما ، وهو الإجراء الذى قد يتبادر إلى الذهن اتخاذ تلقائيا لأول وهلة ولكننا قد نلجأ إليه مع ذلك أحيانا ، إذا فشلنا فى اتخاذ ما سوف يتم شرحه من اجراءات فيما بعد .

عندما يكون المحرك دأرا بالحمل فى حالة طبيعة فان هذا يعنى وجود اتزان ديناميكى (dynamic equilibrium) بين عزم الدوران الكهربائى T_e الذى يبذله المحرك ، وعزم الدوران الميكانيكى المضاد T_m الذى يسببه وجود الحمل . وفى هذه الحالة تكون سرعة دوران المحرك n محددة لمعامل الانزلاق s ، الذى يتعين على أساسه عزم الدوران الكهربائى للمحرك T_e على منحني عزم الدوران فى منطقة الاتزان ، كما سبق شرحه من قبل .

إذا فرضنا أن الضغط الخطي للينبوع (line voltage) هو V ، وأن التيار الخطى هو I_3 ، ومعامل القدرة $\cos \phi_3$ ، ومعامل جودة المحرك η_3 ، وهو دأر بالحمل الكامل فى حالة طبيعية والخطوط الثلاثة متصلة، نجد أن قدرة المخرج P_3 عبارة عن :

$$P_3 = \sqrt{3} V I_3 \cos \phi_3 \times \eta_3$$

وإذا فرضنا أن التيار الذى يأخذه المحرك بين خطين عند فصل الخط الثالث هو I_1 ومعامل القدرة $\cos \phi_1$ ، ومعامل جودة المحرك η_1 فى هذه الحالة ، فإن قدرة المخرج للحمل P_1 تكون :

$$P_1 = V I_1 \cos \phi_1 \times \eta_1$$

وحيث أنه لم يتغير أى شىء بالنسبة للحمل ، وهو يأخذ القدرة التى يحتاج إليها من المحرك فى أى شكل من الاشكال ، فإن $P_3 = P_1$ ، وحينئذ نجد أن :

$$\sqrt{3} V I_3 \cos \phi_3 \times \eta_3 = V I_1 \cos \phi_1 \times \eta_1$$

$$\therefore I_1 = I_3 \frac{\cos \phi_3 \eta_3}{\cos \phi_1 \eta_1} \times \sqrt{3}$$

وهذه هى قيمة التيار الذى يسحبه المحرك بين خطين ، بالنسبة للتيار الخطى والخطوط الثلاثة متصلة . ومن الواضح أن المحرك سوف يأخذ تيارا I_1 فى الحالة الجديدة اكبر من I_3 الأصىلى لكى يستطيع مواجهة الحمل . وهذا يعنى أنه فى حالة انفصال أحد الخطوط سوف يكون عزم الدوران الميكانيكى المطباد T_m أكبر من عزم دوران المحرك T_e ، مما يؤدى إلى وجود عزم دوران تقصيرى (retarding torque) يعمل على تقليل سرعة المحرك n ، وبالتالى زيادة معامل الإنزلاق s . ونظرا لأن زيادة معامل الإنزلاق فى منطقة الاتزان يؤدى إلى زيادة عزم الدوران الذى يبذله المحرك ، فأننا نتوقع بقاء المحرك فى حالة الاتزان

عندما يتفصل أحد الخطوط، مع زيادة التيار الذي يسحب بين الخطين الباقيين، على النحو المبين سابقاً، لمواجهة الحمل .

فإذا اعتبرنا أن قيمة $\frac{\cos \phi_3 \eta_3}{\cos \phi_1 \eta_1}$ قريبة من الواحد الصحيح ، فإن هذا يعنى أن تيار المحرك سوف يزداد إلى ١.٧ مرة تقريباً ، وهو ما يعتبر حملاً زائداً على المحرك لا يمكن تركه أكثر من بضعة دقائق دون فصله ، هذا إذا لم يتم متمم فوق الحمل بإداء هذه المهمة تلقائياً بعد وقت محدد . والحل الظاهري هذه الحالة هو تقليل الحمل على المحرك بنسبة $\frac{1}{\sqrt{3}}$ تقريباً ، أى إلى حوالى ٥٧٪ من الحمل الأسمى ، حتى يمكن للمحرك أدائه دون أن يلحق به الضرر .

هذا وبتطبيق نظرية المركبات المتأثلة على تيارات المحرك مع اعتبار أن الخط المفصول هو الخط رقم ١ نحصل على الآتى :

$$I_1 = 0 , I_2 = I , I_3 = -I$$

وتكون المركبات المتأثلة للتيار عبارة عن :

$$I_0 = \frac{1}{3} (I_1 + I_2 + I_3) = \frac{1}{3} (0 + I - I) = 0$$

$$I_p = \frac{1}{3} (I_1 + a I_2 + a^2 I_3) = \frac{1}{3} (0 + a I - a^2 I)$$

$$= \frac{1}{3} (a - a^2) I = \frac{j}{\sqrt{3}} I , (a - a^2) = j \sqrt{3}$$

$$I_n = \frac{1}{3} (I_1 + a^2 I_2 + a I_3) = \frac{1}{3} (0 + a^2 I - a I)$$

$$= \frac{1}{3} (a^2 - a) I = - \frac{j}{\sqrt{3}} I ,$$

$$(a^2 - a) = -j \sqrt{3}$$

وهذا يعنى وجود مجالين مغناطيسيين دائريين متساويين يدوران في

اتجاهين متضادين بنفس سرعة التزامن ، على نفس النمط الذى سوف يتم مياته عند شرح المحرك التأثيرى أحادى المرحلة فى باب قادم . ويؤدى ذلك إلى وجود تيارين تأثيريين فى ملفات العضو الدائر ، مما يعمل على زيادة مفقودات النحاس فى هذه الملفات وانخفاض قيمة معامل الجودة للمحرك . وينتج عن وجود المجال المغناطيسى الجليد ، بعد انفصال أحد الخطوط ، وهو الذى يدور فى عكس اتجاه دوران المحرك ، ظهور طنين أو أزيز ناشئ عن اهتزازات مغناطيسية فى رقائق حديد العضو الدائر (magnetic vibrations) . ويكون هذا الطنين أو الأزيز عادة هو العامل الأساسى الذى يمكن أن ينبه القائم على تشغيل المحرك إلى حدوث الانفصال فى أحد الخطوط . كذلك يؤدى وجود المجالين المغناطيسيين إلى انخفاض قيمة معامل القدرة $\cos \phi_1$ الجديد عن قيمة معامل القدرة الأصلية $\cos \phi_3$.

وهذا كله يعنى أن قيمة الكسر $\frac{\cos \phi_3 \eta_3}{\cos \phi_1 \eta_1}$ سوف تكون اكبر قليلا من الواحد الصحيح ، مما يجعلنا تفضل خفض الحمل على المحرك إلى ٥٠٪ فقط من الحمل الإصلى ، بدلا من ٥٧٪ التى أشرنا إليها من قبل .

مثال محلول :

A 3 phase induction motor is running on a constant load , when one of the Supply lines to it becomes disconnected . The overload circuit breakers will operate at 1.4 times full load Current , and the motor is running at 0.75 of full load.

Calculate approximately the current in each phase in terms of the full load Current , both for a star Connected and for a delta connected stator .

يبين شكل (١٢ - ٣) توصيل المحرك فى حالتى الدلتا والنجمة بعد فتح

أحد الخطوط ، حيث يأخذ المحرك التيار I_1 بين الخطين المتصلين . ومن التحليل السابق ، مع اعتبار $\frac{\cos \phi_3 \eta_3}{\cos \phi_1 \eta_1}$ يساوى الواحد الصحيح ، نجد بالنسبة لحالة النجمة أن تيار الخط هو التيار المرحلى وهو :

$$I_1 = \sqrt{3} I_3 = \sqrt{3} \times 0.75 I_{f,1} = 1.299 I_{f,1}$$

حيث $I_{f,1}$ هو تيار الحمل الكامل عندما تكون الخطوط الثلاثة متصلة . ونظرا لأن قاطع الدائرة مضبوط على أساس فتح الخطوط عند $1.4 I_{f,1}$ فن المرجح أنه سوف يظل مقفلا .

أما بالنسبة لحالة الدلتا فإن التيار المسحوب بين خطين I_1 بعد فصل الخط الثالث سوف تكون له نفس القيمة السابقة وهى $1.299 I_{f,1}$ ، حيث لم يتغير أى شيء بالنسبة للخطوط . ولكننا نجد أن توصيل المراحل بعد الفصل يختلف الآن عن الحالة السابقة ، حيث تصبح المرحلتان الخارج من بينهما الخط المقصود موصلتين معا على التوالى ، ومتصل معهما على التوازي المرحلة الثالثة الواصلة على الخطين الباقيين . ونظرا لأن المراحل الثلاث متماثلة من ناحية معاوقة التيار ، فن الواضح أن التيار الخطى I_1 سوف ينقسم بنسبة ١ : ٢ فى الممرين المتصلين على التوازي ، بحيث يمر I_1 فى المرحلتين المتصلتين على التوالى معا ، ويمر I_1 فى المرحلة الثالثة .

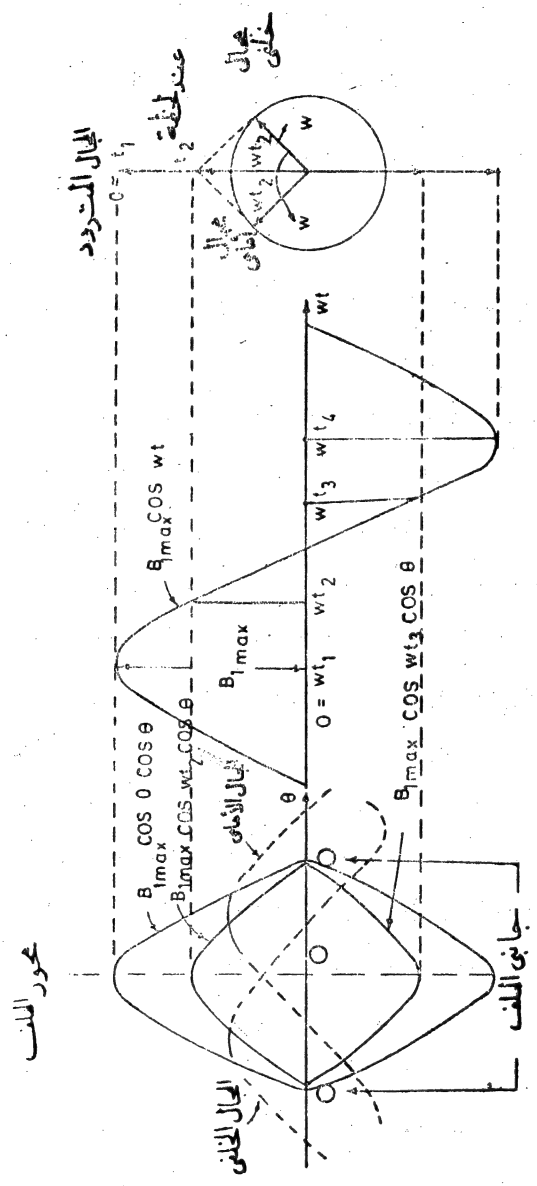
الباب السابع

المحركات التأثيرية أحادية المرحلة

Single - Phases Induction Motors

نبذة عامة :

يشبه المحرك التأثيري أحادي المرحلة الشائع الاستعمال المحرك التأثيري ثلاثي المراحل ذا القفص السنجابي عموما في تكوينه ، فيما عدا ترتيب الملفات في العضو الثابت ، حيث تكون الملفات احادية المرحلة في هذه الحالة . وعند مرور تيار متردد في هذه الملفات ، من ينبوع احادي المرحلة ، نحصل على موجة للقوة الدافعة المغناطيسية يكون توزيعها ثابت الشكل بالنسبة الفراغ ولكنها تتغير في القيمة مع الزمن على حسب تغير تيار الينبوع المتردد . يتم توزيع الملفات في مجارى العضو الثابت بحيث نحصل على قوة دافعة مغناطيسية يكون توزيعها الفراغي على شكل منحنى جيبي ، ومن ثم نحصل على منحنى جيبي لكثافة الخطوط المغناطيسية في الثغرة الهوائية B ، كما هو موضح في شكل (١ - ٤) ، الذى يفترض فيه أن ملفات العضو الثابت مركزة في ملف واحد ذى جانبيين فقط ، وأن النهاية العظمى لكثافة الخطوط المغناطيسية تقع على محور هذا الملف . يظل منحنى كثافة الخطوط المغناطيسية محتفظا بشكله الجيبي هذا ، ولكن احداثياته تتغير من لحظة إلى أخرى بتغير قيمة التيار المتردد اللحظية الذى يصنعه ، فنحصل على المنحنيات الجيبية الميئة في الشكل عند اللحظات المختارة t_1 ، t_2 ، t_3 ، t_4 . شكل (١ - ٤) يبين كيف تتغير قيمة النهاية العظمى لكثافة الخطوط المغناطيسية عند محور الملف مع تغير التيار المتردد ذى الشكل الجيبي أيضا ، على أساس أن B_{Imax} هى النهاية العظمى لكثافة الخطوط المغناطيسية على محور الملف ، عندما تكون قيمة التيار المتردد المار فيه في نهايتها العظمى أيضا . وهذا يعنى أنه عند اللحظة t_2 تصبح قيمة



شكل (١-٤)

النهاية العظمى لكثافة الخطوط المغناطيسية عند محور الملف هي $B_{1\max} \cos \omega t_2$ على أساس تغير قيمة التيار المار من $I_{1\max}$ في الحالة الأولى إلى $I_{1\max} \cos \omega t_2$ في الحالة الثانية. فإذا اعتبرنا أية نقطة على محيط العضو الثابت تبعد عن محور الملف بزاوية مقدارها θ ، فإن قيمة كثافة الخطوط المغناطيسية B بدلالة قيمة النهاية العظمى اللحظية عند اللحظة t هي عند محور الملف $F_{1\max} \cos \omega t$ ، وعند النقطة المحددة بالزاوية θ هي :

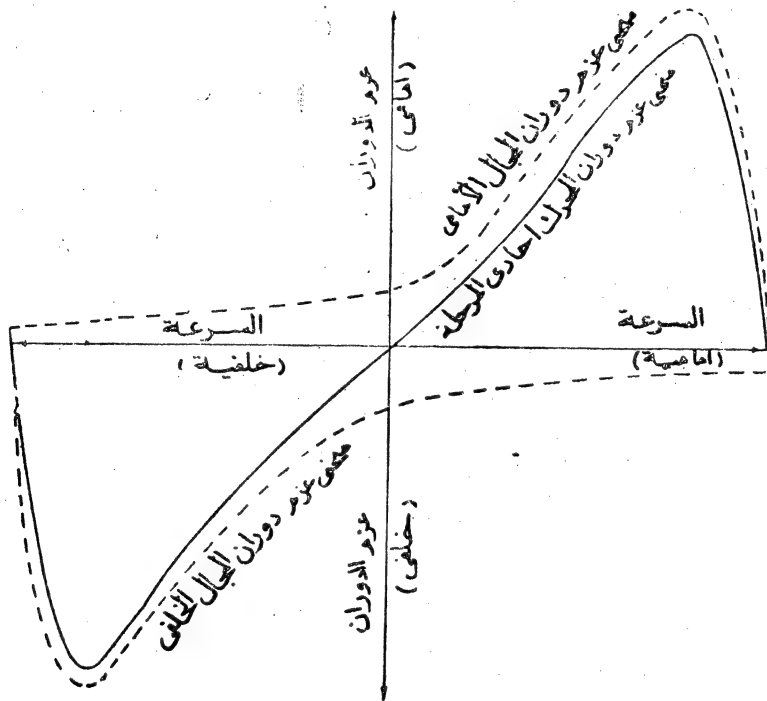
$$B = B_{1\max} \cos \omega t \cos \theta \quad (٤-١)$$

$$= \frac{1}{2} B_{1\max} \cos (\theta - \omega t) +$$

$$\frac{1}{2} (B_{1\max} \cos (\theta + \omega t)) \quad (٤-٢)$$

يمثل كل حد من الحدين في المعادلة (٤-٢) موجة سائرة (travelling wave) ذات اتساع $\frac{1}{2} B_{1\max}$ (amplitude)، بحيث تدور الموجتان في اتجاهين متضادين بنفس السرعة الزاوية ω حول محيط المنتج، كما سبق شرحه بالتفصيل في بند التوافقيات الفراغية وعلاقتها بتوافقيات منحنى التيار صفحة ١٠٨ من كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربائية. ويمكن اعتبار كل من هاتين الموجتين مجالاً مغناطيسياً دائرياً يقوم بنفس عمل المجال المغناطيسي الدائر في حالة المحرك التأثيري ثلاثي المراحل. وهذا يعني أننا نستطيع الحصول على نظرية المحرك التأثيري أحادي المرحلة، بتطبيق قاعدة التجميع على خواص محركين متشابهين، كل منهما ثلاثي المراحل، ويدور أحدهما في عكس اتجاه الآخر. فإذا أطلقنا على المجال الذي يدور في الاتجاه الموجب (وليكن عكس اتجاه عقرب الساعة)، كما تفعل عادة، اسم المجال الأمامي (forward field)، وعلى المجال الآخر اسم المجال الخلفي (backward field)، ورسمنا منحنى عزم الدوران لكل منهما باعتبار أنه عزم دوران المحرك الثلاثي، الذي سبقت

دراسته بالتفصيل في الباب الأول ، نستطيع كما هو مبين في شكل (٢ - ٤) الحصول على منحنى عزم الدوران للمحرك التأثيرى احدى المرحلة . ويكون عزم الدوران الذى يتولد بتأثير المجال المغناطيسى الأمامى على القفص السنجابى فى العضو الدائر مضادا لعزم الدوران الذى ينشأ بفعل المجال المغناطيسى الخلفى فى نفس القفص السنجابى على العضو الدائر . فى حالة السكون تكون قيمة عزم الدوران الناشئة عن كل من المجالين واحدة مما يجعل محصلة عزم الدوران المؤثر على العضو الدائر فى هذه الحالة تساوى صفرا ، فلا يوجد عزم دوران بدء للمحرك احدى المرحلة ، وهى احدى الخصائص المميزة لهذا المحرك .



(شكل ٢ - ٤)

عندما يدور المحرك في الاتجاه الموجب ، أى في نفس اتجاه دوران المجال الأمامى ، ويكون معامل الانزلاق $s = \frac{n_s - n}{n_s}$ ، يكون المجال الخلفى دائرا في عكس الاتجاه بالسرعة n_s ، مما يعنى أنه يدور بالسرعة $(n_s + n)$ بالنسبة للعضو الدائر . وباعتبار التعريف الأساسى لمعامل الانزلاق ، وهو خارج قسم سرعة دوران المجال المغناطيسى الخلفى ، بالنسبة للعضو الدائر ، على سرعة التزامن ، يكون معامل الانزلاق الخاص بهذا المجال هو

$$\frac{n_s + n}{n_s} = \frac{2 n_s + n - n}{n_s} = \frac{2 n_s - (n_s - n)}{n_s} = (2 - s) \quad (٤-٣)$$

أى أن قيمة معامل الانزلاق الخاص بالمجال الخلفى تكون كبيرة جدا بالنسبة لقيمة معامل الانزلاق الخاص بالمجال الأمامى ، وهذا يعنى أن القوة الدافعة الكهربية المتولدة في ملفات العضو الدائر $E_{20} (2 - s)$ بفعل المجال الخلفى تكون كبيرة بالنسبة للقوة الدافعة الكهربية المتولدة بفعل المجال الأمامى $S E_{20}$. ولكن في نفس الوقت تكون ممانعة التسرب في العضو الدائر في حالة المجال الخلفى $X_{20} (2 - s)$ كبيرة بالنسبة لممانعة التسرب في حالة المجال الأمامى $S X_{20}$. والنتيجة الاجمالية في هذه الحالة أن المجال الخلفى ينشئ تيارا في ملفات العضو الدائر يكون أكبر قيمة من التيار الذى ينشئه المجال الأمامى ، كما أن تردده $f_1 (2 - s)$ يكون ضعف تردد اليذبوع تقريبا ، ولكن معامل قدرته يكون منخفضا جدا بسبب انخفاض النسبة $\frac{R_2}{(2 - s) X_{20}}$ انخفاضاً كبيراً بالنسبة لهذا المجال . وعلى هذا الاساس يمكن تلخيص تأثير المجال المغناطيسى الخلفى بالنسبة لتشغيل المحرك بفعل المجال المغناطيسى الأمامى فيما يلى :

١ - زيادة المفقودات النحاسية للعضو الدائر ، بفعل التيار الناشئ عن المجال الخلفى ، وهو يزيد في قيمته وتردده على التيار الناشئ عن المجال الأمامى .

٢ - يكون تأثير تيار العضو الدائر الكبير، ذى معامل القدرة المنخفض، الناشئ عن المجال الخلفى، تأثيرا مغناطيسيا كبيرا مضادا لهذا المجال عندما تزداد سرعة المحرك، مما يقلل من محصلة خطوط القوى المغناطيسية الناشئة في الفجوة الهوائية للمحرك بفعل هذا المجال، وبالتالي من تأثيره على عزم دوران المحرك. وفي الحقيقة أنه بينما تزداد محصلة خطوط القوى المغناطيسية الناشئة عن المجال الأمامى بازدياد السرعة، تقل محصلة خطوط القوى المغناطيسية الناشئة عن المجال الخلفى، بحيث يظل مجموعها ثابتا تقريبا، وهو ما يلزم لانتاج القوة الدافعة الكهربائية المضادة في ملفات العضو الثابت، التى يمكن اعتبارها ثابتة تقريبا، إذا كانت قيمة هبوط الضغط في معاوقة التسرب للعضو الثابت صغيرة. وفي الحقيقة فإن المجال المغناطيسى الأمامى يكون أكبر كثيرا من المجال المغناطيسى الخلفى، بحيث نستطيع أن نعتبر أن المجال المحصل الناشئ في الفجوة الهوائية للمحرك، لا يختلف عن المجال المغناطيسى الدائر في المحرك ثلاثى المراحل في ملاحظ كثيرة من نواحي تأثيره.

٣ - ينشأ عن التشابك بين كل من المجال المغناطيسى الدائر وموجة القوة الدافعة المغناطيسية الدائرين في اتجاهين متضادين، نبضات في عزم الدوران (torque pulsations) ذات تردد ضعف تردد الينبوع. وتكون حصيلة عزم الدوران المتوسط لهذه النبضات بالنسبة للزمن صفرا، ولكنها تؤدي إلى صدور ضجة (Noise) عن المحرك احدى المرحلة لا توجد في المحركات ثلاثية المراحل. ولا تظهر هذه النبضات في منحنى عزم الدوران مع السرعة للمحرك احدى المرحلة، نظرا لأن عزم الدوران في هذه الحالة هو القيمة المتوسطة بالنسبة للزمن.

طرق البدء ومنحنيات التشغيل للمحركات التآثيرية احادية المرحلة :

(Methods of starting and performance Characteristics of single phase induction motors)

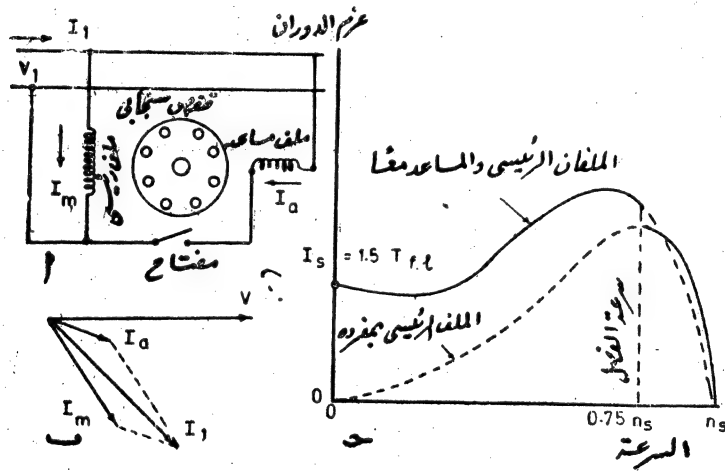
يكون تصنيف المحركات التآثيرية احادية المرحلة على حسب طرق البدء

فيها ، وتم تسميتها عادة على هذا الأساس . وفيما يلي نتناول بالوصف والتحليل المختصر على هذا النحو للأنواع شائعة الاستعمال من هذه المحركات .

١ - المحرك مشطور المرحلة (Split - phase Motor) .

يحتوي العضو الثابت لهذا النوع من المحركات على نوعين من الملفات ، وهما الملفات الرئيسية س والم ملفات المساعدة ع ، ويكون توزيع هذه الملفات في مجارى العضو الثابت بحيث توجد زاوية فراغية بين محوريهما مقدارها تسعون درجة كهربية ، وبين شكل (٣ - ٤) الملفات في المحرك موصلة على هذا الأساس .

ويراعى أن تمتلك الملفات المساعدة مقاومة كبيرة بالنسبة لماعتها ، فتكون لذلك من أسلاك رفيعة ، في حين تكون نسبة المقاومة إلى الممانعة أقل من ذلك بصورة ملحوظة في الملفات الرئيسية . ونظرا لأن كلا من نوعين الملفات موصل على ضغط واحد لنفس الينبوع ، فإن الوضع المرحلى لكل من تيارى



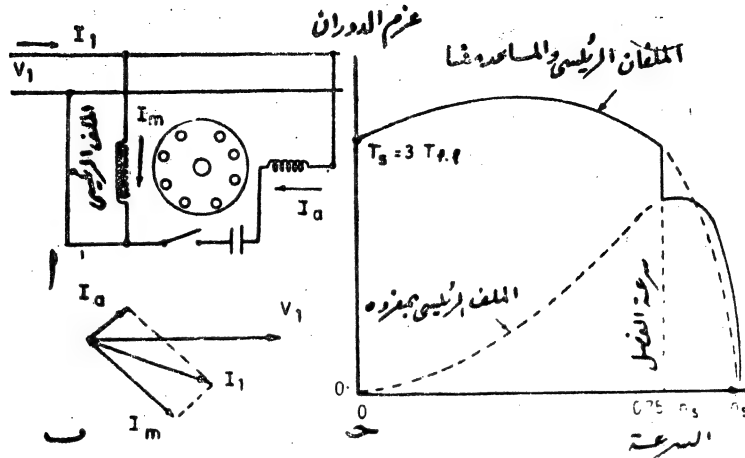
(شكل ٣ - ٤)

هذه الملفات يصبح كما هو مبين في شكل (٣ - ٤) ب ، حيث يكون تيار الملفات المساعدة I_a متأخرا بزاوية صغيرة على ضغط الينبوع ، بينما يكون تيار الملفات الرئيسية I_m متأخرا بزاوية اكبر من ذلك بصورة ملحوظة على نفس الضغط . ينتج عن ذلك أن يصبح المحرك مكافئا لمحرك ذى مرحلتين ، تتمثلان في الملفات الرئيسية والملفات المساعدة ، مما يعنى وجود مجال مغناطيسى دائر في المحرك ، وهو الذى يجعل عملية البدء ممكنة ، ويؤدى إلى دوران المحرك عند وصل نوعي الملفات بالينبوع . ويتم فصل الملفات المساعدة عن الينبوع عندما يضل المحرك إلى حوالي ٧٥٪ من سرعة التزامن ، ويكون باستخدام مفتاح يعمل بالقوة الطاردة المركزية (Centrifugal switch) .

هذا ونظرا لأن الملفات المساعدة لا تعمل إلا في خلال فترة البدء فقط ، فان صنعها من أسلاك رفيعة لكى تكون مقاومتها عالية لا يشكل خطرا عليها ، كما أنه يمكن تقليل ممانعتها بوضعها في الأجزاء العليا من الجارى . وبين شكل (٣ - ٤) ج منحنى الخواص التقليدى لهذا المحرك في خلال فترة البدء عندما يؤثر نوعا الملفات معا ، ثم بعد أن تصبح الملفات الرئيسية عاملة بمفردها بعد انفصال الملفات المساعدة عن الينبوع . وتبين أجزاء المنحنى المتقطع ما يمكن أن يحدث لو لم تكن الملفات المساعدة موجودة في خلال فترة البدء ، ثم لو استمرت هذه الملفات تعمل مع الملفات الرئيسية في خلال فترة التشغيل .

٢ - المحرك ذو مكثف البدء : (Capacitor - start Induction Motor)

يكون الحاصل على عزم دوران بدء لهذا المحرك على نفس الأساس في المحرك السابق من حيث تزويد المحرك بنوعين من الملفات ، رئيسية ومساعدة ، تجعل المحرك مكافئا لمحرك ذى مرحلتين مع تغذيته من ينبوع احادى المرحلة . ويتم تكوين زاوية فرق مرحلى زمنى (angle of time - phase difference) بين تيارى التغذية من نفس الينبوع بتوصيل مكثف على التوالى مع الملفات المساعدة ، كما هو مبين في شكل (٤ - ٤) ا



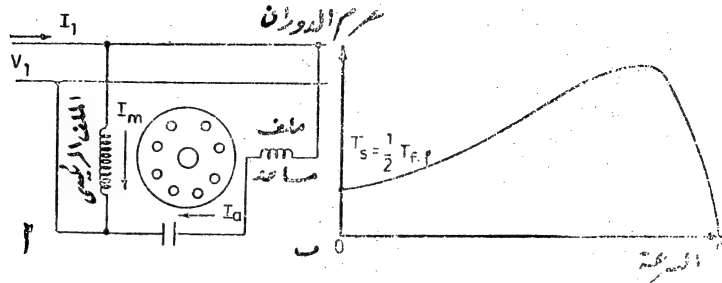
شكل (٤ - ٤)

ويتم فصل الملفات المساعدة في هذه الحالة أيضا على النحو السابق بعد بدء المحرك، مما يعني اقتصار عمل الملفات المساعدة ومكثف البدء على فترة البدء فقط. وهذا يساعد على تقليل تكلفة كل منها. يبين شكل (٤ - ٤) ب مخطط المتجهات، كما يبين شكل (٤ - ٤) - منحنى عزم الدوران مع السرعة، على نفس النمط المبين به في الحالة السابقة.

٣ - المحرك ذو المكثف الدائم (Permanent-split-capacitor motor)

يمكن أن تظل الملفات المساعدة عاملة مع الملفات الرئيسية أثناء تشغيل المحرك، بتركها موصلة على الينبوع خلال فترة التشغيل، بعد انتهاء فترة البدء. فيتم الاستغناء عن المفتاح S المشار إليه في الحالتين السابقتين، كما هو مبين في شكل (٤ - ٥) أ، ويصبح المحرك أكثر بساطة في تكوينه، حيث يصبح هذا المفتاح منشأ لبعض المتاعب الفنية أحيانا. ويكون تصميم الملفات المساعدة والمكثف على هذا الأساس عند الحمل المطلوب، وينتفي وجود المجال الخلفي، مما يؤدي إلى تحسن في قيمة معامل الجودة في هذه الحالة. كذلك تختفي الضجة

الصادرة عن المحرك نتيجة لاختفاء نبضات عزم الدوران ذي التردد المضاعف



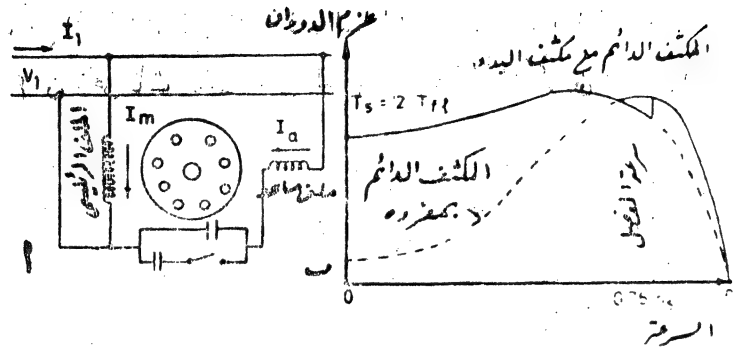
(شكل ٥ - ٤)

الذي سبقت الإشارة إليه . ولكن يلزم استخدام مكثف ورقى مشبع بالزيت (oil impregnated paper) ، وهو أغلى ثمنًا من المكثفات ذات السائل الكهربى (electrolytic capacitors) ، التى يمكن استخدامها مع المحرك ذو مكثف البدء . كذلك نلاحظ فى شكل (٥ - ٤) ب أن عزم دوران البدء يقل عن الحالة السابقة ، حيث يتم اختيار المكثف فى هذه الحالة على أساس الموازنة بين متطلبات فترة البدء والتشغيل معا .

٤ - المحرك ذو المكثفين (Two - value - capacitor motor) :

يمكن استخدام مكثفين ، أحدهما خاص بفترة البدء فقط ، والآخر يتجاوز عمله فترة البدء إلى فترة التشغيل أيضا ، بحيث نستطيع الموازنة فى هذه الحالة بين الخواص المفضلة المطلوبة فى الفترتين معا .

يبين شكل (٦ - ٤) الرسم التخطيطى لمحرك من هذا النوع يستخدم فيه مكثف صغير من النوع الورقى ، يتم توصيله مع الملفات المساعدة توصيلا دائما خلال فترة التشغيل على الينبوع ، لاعطاء افضل الخواص المطلوبة فى هذه الفترة ، كما يستخدم فيه أيضا مكثف بدء من النوع ذو السائل الكهربى ،



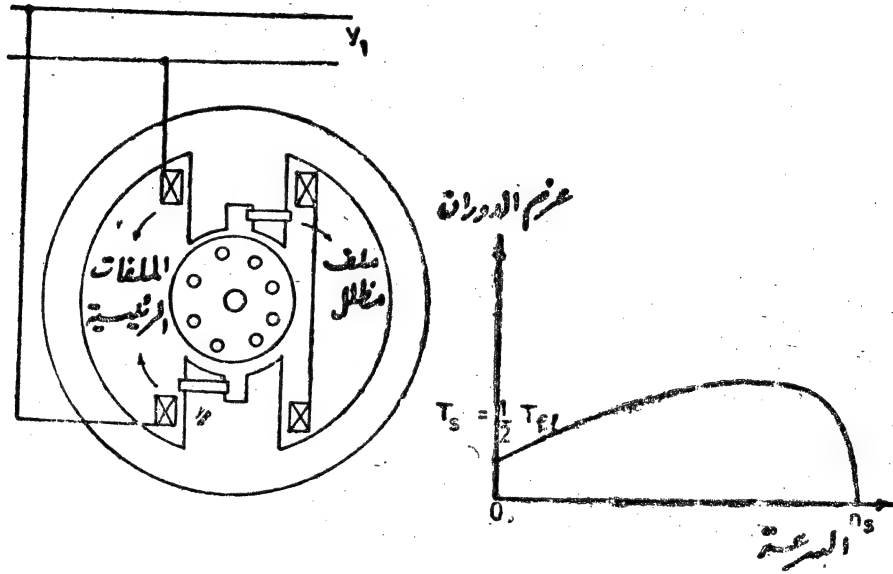
(شكل ٤-٦)

موصل مع المفتاح الخاص به على التوازي مع المكثف الورقي، لكي يعمل معه في خلال فترة البدء فقط، ثم يصبح منفصلاً في خلال فترة التشغيل.

٥ - المحرك ذو القطب المظلل (Shaded - pole motor)

يتكون العضو الثابت في هذا المحرك من أقطاب بارزة ، كما هو مبين في شكل (٤ - ٧) حيث يتم تطبيق جزء من كل قطب منها بلفة مقصورة من النحاس يطلق عليها اسم الملف المظلل (Shading coil) . تتولد في هذه اللفة المقصورة تيارات تأثيرية بفعل جزء الفيض المغناطيسي للقطب المتشابك معها ، يؤدي إلى جعل محصلة هذا الجزء من الفيض المغناطيسي ، الناشئ عن التيارات التأثيرية ، متخلفاً زمنياً بزاوية مرحلية عن الجزء الباقي من الفيض المغناطيسي المار في الجزء الآخر من القطب . وينشأ عن ذلك ظاهرة تكافؤ ظاهرة وجود مجال مغناطيسي دائري ، يتحرك من الجزء غير المظلل إلى ناحية الجزء المظلل من القطب ، مما يعني وجود عزم دوران بدء صغير ، يعمل على بدء دوران المحرك . وبين شكل (٤ - ٧) ب شكل منحنى عزم الدوران منع السرعة لهذا المحرك . ويقتصر استخدام هذه الطريقة عادة على المحركات الصغيرة

جدا ، مثل تلك التي تستخدم في المراوح الصغيرة أو تلك التي تكون وسيلة البدء في المحركات المستخدمة في الساعات . ويكون معامل الجودة في هذا النوع من المحركات صغيرا ، ولكنه يتميز ببساطة التكوين ورخص الثمن .



(شكل ٧ - ٤)

استخدام نظرية المجال المغناطيسي الدائر في تحليل المحركات التأثيرية

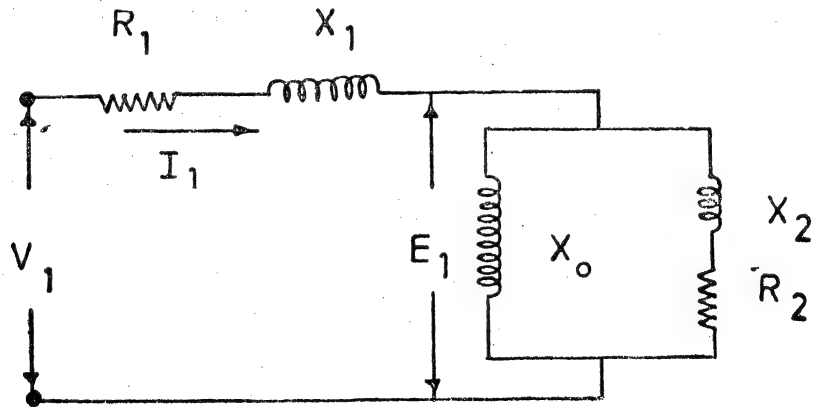
إحدى المرحلة :

Application of the revolving field theory in single-phase Induction Motors)

سبق أن بينا أن المجال المغناطيسي المتردد، الذي ينشئه الملف الرئيسي في المحرك التأثيري أحادي المرحلة ، نتيجة لمرور تيار الينبوع أحادي المرحلة فيه ، يمكن تحليله إلى مجالين يدور كل منهما في عكس اتجاه دوران الآخر ، بنفس

سرعة التزامن n_s ، ويكون اتساع موجة القوة الدافعة المغناطيسية في كل من المجالين نصف اتساع موجة القوة الدافعة المغناطيسية للمجال المتردد . ويقوم كل من هذين المجالين بانشاء تيارات تأثيرية خاصة به في ملفات العضو الدائر ، وتوليد عزم دوران تأثيري على أساس نظرية المحرك التأثيري ثلاثي المراحل كما سبق شرحها بالضبط . ويمكن على هذا النحو عمل تحليل كمي (quantative) للمحرك التأثيري أحادي المرحلة على نمط التحليل الذي سبق استخدامه في المحركات التأثيرية ثلاثية المراحل ، وذلك بتطبيق نظريات الأخيرة على كل من مجالي الاول .

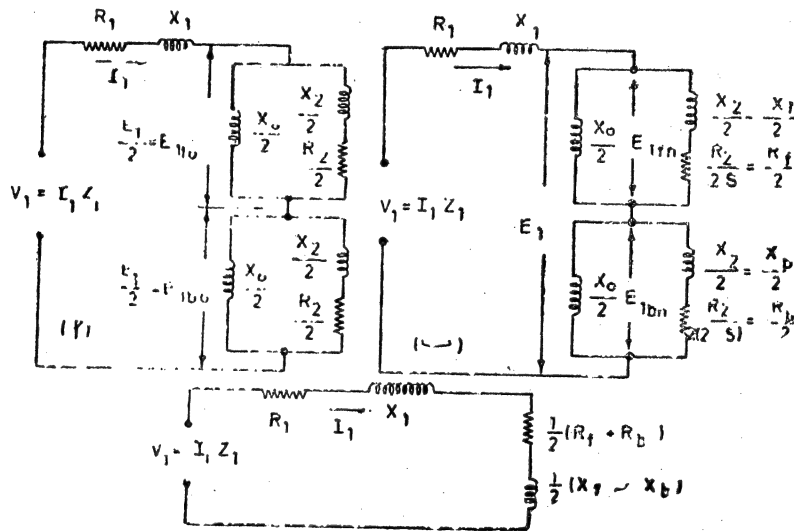
نبدأ أولاً بالحالة التي يكون فيها العضو الدائر لا يزال في حالة السكون ، عندما يوصل الملف الرئيسي في المحرك احادي المرحلة إلى يذبوع لتيار المتردد . تتكون الدائرة المكافئة للمحرك في هذه الحالة من الملف الثانوي المقصور ذي المقاومة R_2 وممانعة التسرب X_{20} ، منسوبتان إلى الملف الابتدائي ، ومن ممانعة تيار المغطسة X_0 ، ثم من مقاومة الملفات الرئيسية على العضو الثابت R_1 وممانعة التسرب لهذه الملفات X_1 . ولا تظهر R_0 في الدائرة المكافئة لأننا نهمل مفقودات الحديد التي نأخذها في الاعتبار بعد ذلك كجزء من المفقودات الميكانيكية . يبين شكل (٨ - ٤) هذه الدائرة المكافئة حينما يكون ضغط



(شكل ٨ - ٤)

اليدوع الموصل إلى المحرك هو V_1 ، والتيار الذي يسرى في الملف الرئيسي على العضو الثابت هو I_1 ، والقوة الدافعة الكهربائية (المضادة) E_1 ، المتولدة في هذا الملف بفعل محصلة المجال المغناطيسي المتعدد (أو الفعل المشترك للمجالين الأمامي والخلفي) مع المجال المغناطيسي الناشئ بفعل تيارات العضو الدار.

يبين شكل (٩ - ٤) الدائرة المكافئة للمحرك على أساس فصل تأثير كل من المجالين الأمامي والخلفي عن بعضهما البعض، بحيث يكون حساب تأثير كل منهما على جزء مستقل من الدائرة المكافئة في القطاع الخاص منها بالعضو الدار. وعندما يكون العضو الدار في حالة السكون، فإنه يتأثر بطريقة مماثلة من كل من المجالين، لأنها متساويان ويدوران بنفس سرعة التزامن في اتجاهين متضادين. لذلك نجد أن الجزء الخاص بكل من المجالين يشبه الآخر في الدائرة المكافئة، كما هو مبين في شكل (٩ - ٤). ونظراً لأن الفيض المغناطيسي الخاص بكل من المجالين الأمامي والخلفي يساوي نصف الفيض المغناطيسي



شكل (٩ - ٤)

للمجال الأصيل المتردد، فإن الثوابت في كل من جزئى الدائرة المكافئة تساوى نصف الثوابت فى القطاع الخاص بالعضو الدائر من الدائرة المكافئة الأصلية.

وعندما يصل المحرك إلى سرعة الدوران المعتادة، n ، يكون المجال الأمامى دائراً بالسرعة n_s فى نفس الاتجاه، أى بمعامل انزلاق s ، بينما يكون المجال الخلفى دائراً بالسرعة $n_s + n$ فى الاتجاه المضاد، أى بمعامل انزلاق $(2 - s)$. وهذا يعنى أن المجال الأمامى يولد تيارات وقوى دافعة كهربية فى ملفات العضو الدائر بتردد sf ، بينما يكون تردد التيارات والقوى الدافعة الكهربية التى يولدها المجال الخلفى فى نفس الملفات $f(2 - s)$. ويترجم تأثير وصول المحرك إلى سرعة الدوران n ، فى الدائرة المكافئة، بقسمة مقاومة العضو الدائر على معامل الانزلاق، أى على s فى الجزء الخاص بالمجال الأمامى، وعلى $(2 - s)$ فى الجزء الخاص بالمجال الخلفى، كما هو مبين فى شكل (٩-ب).

يمكننا على هذا الأساس اعتبار معاوقة أمامية Z_f ومعاوقة خلفية Z_b بحيث يكون $Z_f \frac{1}{2}$ هو معاوقة المدخل بالنسبة لجزء الدائرة المكافئة الخاص بالمجال الأمامى، $Z_b \frac{1}{2}$ هو معاوقة المدخل بالنسبة لجزء الدائرة المكافئة الخاص بالمجال الخلفى. وهذا يعنى أن:

$$Z_f = \frac{\left(\frac{R_2}{s} + J X_2\right) J X_0}{\frac{R_2}{s} + X_2 + J X_0} = R_f + J X_f \quad (٩-٤)$$

$$Z_b = \frac{\left(\frac{R_2}{2-s} + J X_2\right) J X_0}{\frac{R_2}{2-s} + J X_2 + J X_0} = R_b + J X_b \quad (٩-٥)$$

$$Z_t = \frac{J X_0 R_2 / S - X_0 X_2}{R_2/S + J (X_2 + X_0)}$$

$$= \frac{\left(\frac{J X_0 R_2}{s} - X_0 X_2 \right) \times \left[\frac{R_2}{s} - j (X_2 + X_0) \right]}{\left(\frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_2 + X_0)^2}$$

لنفرض أن $X_2 + X_0 = X_{22}$

$$= \frac{\left(\frac{J X_0 R_2}{s} - X_0 X_2 \right) \left(\frac{R_2}{s} - j X_{22} \right)}{\left(\frac{R_2}{s} \right)^2 + X_{22}^2}$$

$$= \frac{\frac{J X_0 R_2^2}{s^2} + \frac{X_0 X_{22} R_2}{s} - \frac{X_0 X_2 R_2}{s} + J X_0 X_2 X_{22}}{\left(\frac{R_2}{s} \right)^2 + X_{22}^2}$$

$$= \frac{S X_0^2 R_2}{R_2^2 + S^2 X_{22}^2} + j \frac{X_0 (R_2^2 + S^2 X_2 X_{22})}{R_2^2 + S^2 X_{22}^2} \quad (٤-٦)$$

$$R_f = \frac{S X_0^2 R_2}{R_2^2 + S^2 (X_{22})^2} = X_0^2 \frac{\frac{R_2}{s}}{\left(\frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_0 + X_2)^2}$$

$$X_{22} = X_0 + X_2 \quad (٤-٧)$$

$$X_f = X_0 \frac{\left(\frac{R_2}{s} \right)^2 + X_2 (X_2 + X_0)}{\left(\frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_2 + X_0)^2} \quad (٤-٨)$$

يمكننا على نفس المنوال، استنباط R_b ، X_b من المعادلة (٤-٢)

$$R_b = X_0^2 \frac{\frac{R_2}{(2-s)}}{\left(\frac{R_2}{(2-s)}\right)^2 + (X_2 + X_0)^2} \quad (٤-٩)$$

$$X_b = X_0 \frac{\left(\frac{R_2}{(2-s)}\right)^2 + X_2 (X_2 + X_0)}{\left(\frac{R_2}{(2-s)}\right)^2 + (X_2 + X_0)^2} \quad (٤-١٠)$$

مثال محلول :

Find the input current and mechanical power output of the $\frac{1}{4}$ HP
4 - pole, 110V, 60 HZ single phase induction motor, whose
constants are given below, at a slip of 0.05

$$R_1 = 1.86 \text{ ohms} \quad X_1 = 2.56 \text{ ohms} \quad X_0 = 53.5 \text{ ohms}$$

$$R_2 = 3.56 \text{ ohms} \quad X_2 = 2.56 \text{ ohms}$$

$$\text{Core loss} = 35 \text{ Watts. Friction and windage} = 13.5 \text{ watts.}$$

لحساب معاوقة المدخل للمحرك Z_i نرجع إلى شكل (٤ - ٩ ب) الخاص
بالدائرة المكافئة للمحرك وهو دارة ، فنجد أن :

$$\begin{aligned} Z_i &= Z_1 + 0.5 Z_f + 0.5 Z_b \\ &= (R_1 + 0.5 R_f + 0.5 R_b) + j (X_1 + 0.5 X_f \\ &\quad + 0.5 X_b) \end{aligned} \quad (٤-١١)$$

ولحساب كل من $0.5 R_f$, $0.5 R_b$, $0.5 X_f$, $0.5 X_b$ مباشرة نعوض
في المعادلات (٤ - ٧) ، (٤ - ٨) ، (٤ - ٩) ، (٤ - ١٠) بنصف القيمة
المعطاة في المسألة لكل من X_2 , R_2 , X_0 ، فنجد أن

$$\begin{aligned} 0.5 R_f &= \frac{\frac{1.78}{0.05} \times (26.75)^2}{\left(\frac{1.78}{0.05}\right)^2 + (1.28 + 2.76)^2} = \frac{25.45}{2055} \\ &= 12.4 \text{ ohms} \end{aligned}$$

$$0.5 X_f = \frac{26.76 (1268 + 35.9)}{1268 + 787} = \frac{26.75 \times 1303.9}{2055}$$

$$= 16.97 \text{ ohms}$$

$$0.5 R_b = \frac{\frac{1.78}{1.95} \times (26.75)^2}{\left(\frac{1.78}{1.95}\right)^2 + 787} = 0.83 \text{ ohm}$$

$$0.5 X_b = \frac{26.75 \left[\left(\frac{1.78}{1.95}\right)^2 + (1.28 + 26.75) 1.28 \right]}{\left(\frac{1.78}{1.95}\right)^2 + 787}$$

$$= \frac{26.75 \times 36.73}{787} = 1.247 \text{ ohm}$$

$$Z_i = (1.86 + 12.4 + 0.83) + j(2.6 + 16.97 + 1.247)$$

$$= 15.09 + j 20.777 = 25.67 \angle 54.01^\circ$$

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_i} = \frac{110}{25.67} \angle -54.1^\circ = 4.28 \angle -54.01^\circ$$

بتطبيق المعادلتين (٧-٤) ، (٨-٤) نجد أن :

$$0.5 I_1^2 R_f = (4.28)^2 \times 12.4 = 227.2 \text{ Watts} = P_{gf}$$

$$0.5 I_1^2 R_b = (4.28)^2 \times 0.83 = 15.2 \text{ Watts} = P_{gb}$$

بتطبيق المعادلة (١٤-٤) نجد أن القدرة الميكانيكية الكلية الداخلية

للمحرك هي :

$$\begin{aligned}
 P_m &= P_g (1 - s) = (1 - s) (P_{gf} - P_{gb}) \\
 &= (1 - 0.05) (227.2 - 15.2) \\
 &= 212 (1 - 0.05) = 201.5 \text{ Watts.}
 \end{aligned}$$

وتكون قدرة المخرج الميكانيكية P_0 عبارة عن P_m بعد انقاص قيمة
المفقودات الميكانيكية :

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 201.5 - (35 + 13.5) = 153 \text{ watt} \\
 &= \frac{153}{746} = 0.205 \text{ HP.}
 \end{aligned}$$

تتولد القوة الدافعة الكهربائية المضادة E_{fa} في ملفات العضو الثابت بتأثير
التيض المغناطيسي المحصل للمجال المغناطيسي الأمامي والمجال المغناطيسي
الناشئ عن التيار الذي يولده المجال الأمامي في ملفات العضو الدائر بالتأثير .
ونظرا لأن التردد في دائرة هذا التيار هو s وهو صغير جدا ، كما أن
 $\frac{R_2}{s}$ تكون كبيرة بالمقارنة بـ X_2 بسبب صغير s ، فإن معامل القدرة
يكون كبيرا أي يقرب من الواحد الصحيح . وهذا يعني أمرين : الأمر
الأول أن التيار ذا التردد الصغير الذي ينشأ بتأثير المجال الأمامي في العضو الدائر ، هو
تيار فعال يعطى قدرة فعالة وعزم دوران كبير ، والأمر الثاني أن هذا التيار
يعطى تبعا لذلك تأثيرا مغناطيسيا متعامدا (cross-magnetising effect)
(راجع نظريات وتصميم الآلات الكهربائية صفحة ١٢٨ و ١٢٩) مما يجعل
قيمة فيض المجال المغناطيسي الأمامي لا تتأثر إقليلا بفعل هذا التأثير المتعامد ،
وتصبح E_{mf} منازرة لما يمكن أن ينتجه المجال المغناطيسي الأمامي بالتقريب .

هذا وتتولد القوة الدافعة الكهربائية المضادة E_{ba} في ملفات العضو الثابت
بتأثير التيض المغناطيسي المحصل للمجال المغناطيسي الخلفي والمجال المغناطيسي

الناسي. عن التيار الذي يولده المجال الخلفي في ملفات العضو الدائر بالتأثير .
ونظرا لأن التردد في دائرة هذا التيار هو $f(2-s)$ وهو كبير نسبيا ، كما
أن $\frac{R_2}{2-s}$ تكون صغيرة بالمقارنة بـ X_2 بسبب كبر $(2-s)$ ، فإن معامل
القدرة يكون صغيرا . وهذا يعنى أمرين : الأمر الأول أن التيار ذا التردد
الكبير، الذى ينشأ بتأثير المجال الخلفي في العضو الدائر هو تيار حثي (غير فعال
تقريبا) يعطى قدرة فعالة صغيرة وعزم دوران صغير ، والأمر الثانى أن
هذا التيار يعطى تبعا لذلك تأثيرا مغناطيسيا مضادا (Demagnetising effect) ،
مما يجعل قيمة فيض المجال المغناطيسى الخلفي تتأثر كثيرا بفعل هذا التأثير
المضاد ، وتصبح E_{1bn} أصغر كثيرا من E_{1fn} .

يمكننا الحصول على المعلومات اللازمة بالنسبة للقدرة وعزم الدوران
بتطبيق القوانين التى تحكمها، كما سبق استخدامها في حالة المركب ثلاثى المراحل .
فاذا فرضنا أن T_f عزم الدوران الداخلى (Internal torque) بالكيلوجرام
متر للمجال الأمامى ، T_b عزم الدوران بالكيلوجرام متر الداخلى للمجال
الخلفى ، P_{gf} قدرة الثغرة الهوائية بالوات للمجال الأمامى ، P_{gb} قدرة الثغرة
الهوائية بالوات للمجال الخلفى ؛ $\omega_s = 2\pi \frac{n_s}{60}$ سرعة التزامن الزاوية
لكل من المجالين ، نجد أن

$$T_f = \frac{P_{gf}}{\omega_s \times 9.81} K_{g.m.} , \quad T_b = \frac{P_{gb}}{\omega_s \times 9.81} K_{g.m.} \quad (١٢ - ٤)$$

$$P_{gf} = 0.5 I_m^2 R_f \text{ Watts} , \quad P_{gb} = 0.5 I_m^2 R_b K_{g.m.} \quad (١٣ - ٤)$$

حيث R_f هى الجزء الحقيقى (المقاومة) في معاوقه المجال الأمامى Z_f كما
تعطىها المعادلة (١ - ٤) ، و R_b هى الجزء الحقيقى (المقاومة) في معادلة

المجال الخلفي Z_b كما تعطىها المعادلة (٤ - ٢) . ونظرا لتضاد حركة المجالين الأمامي والخلفي فإن عزم الدوران T_f , T_b يكونان متضادين ، ويكون عزم الدوران المحصل ، وعزم الدوران الداخلى للمحرك ، هو الفرق بينهما أي أن :

$$T = T_f - T_b = \frac{1}{\omega_s \times 9.81} (P_{gf} - P_{gb}) K_{g.m.} \quad (٤ - ١٤)$$

يمكننا الحصول على المفقودات النحاسية (Cu losses) في ملفات العضو الدائر باستخدام العلاقة التي تربطها بقدرة الثغرة الهوائية ، كما استخدمت في المحرك الثلاثي ، أي أن :

المفقودات النحاسية في العضو الدائر الناشئة عن المجال الأمامي :

$$sP_{gf} \quad (٤ - ١٥)$$

المفقودات النحاسية في العضو الدائر الناشئة عن المجال الخلفي :

$$(2 - s) P_{gb} \quad (٤ - ١٦)$$

المفقودات النحاسية الكلية في العضو الدائر :

$$sP_{gf} + (2 - s) P_{gb} \quad (٤ - ١٧)$$

ومن المعادلة (٤ - ٥) نجد أن قدرة الثغرة الهوائية الكلية P_g عبارة عن :

$$P_g = \omega_s T = (P_{gf} - P_{gb}) \quad (٤ - ١٨)$$

وتكون قيمة القدرة الميكانيكية الكلية P_m (قدرة المخرج مضافا إليها المفقودات الميكانيكية) عبارة عن :

$$P_m = P_g (1 - s) = (1 - s) (P_{gf} - P_{gb}) \quad (٤ - ١٩)$$

$$P_m = P_{gf} (1 - s) + P_{gb} [1 - (2 - s)]$$

$$= P_{gf} (1 - s) - P_{gb} (1 - s) \quad \text{أو}$$

$$= (1 - s) (P_{gf} - P_{gb}) \quad (٤ - ٢٠)$$

إذا أردنا الحصول على قيمة النهاية العظمى لعزم الدوران، وقيمة معامل الانزلاق التي يحدث عندها هذا العزم، نجد أن الأمور تختلف عنها في حالة المحرك

ثلاثي المراحل، حيث وجدنا أن قيمة النهاية العظمى لعزم الدوران لم تكن تتوقف على قيمة المقاومة المرحلية للعضو الدائر، بينما تتوقف في حالة المحرك احادي المرحلة. ويؤدي وجود المجال الخلفي في المحرك احادي المرحلة إلى خفض قيمة النهاية العظمى لعزم الدوران، وتقليل قيمة معامل الانزلاق التي تحدث عندها هذه النهاية، كما يؤدي وجود هذا المجال أيضا إلى خفض قيمة معامل الجودة للمحرك بسبب زيادة المفقودات النحاسية في ملفات العضو الدائر، وكذلك زيادة المفقودات النحاسية في ملفات العضو الثابت بسبب ارتفاع قيمة تياره. هذا ويكون المحرك احادي المرحلة الذي يمتلك نفس مقنن القدرة والسرعة لمحرك ثلاثي المراحل اكبر حجما من هذا الأخير. وعلى الرغم من زيادة الحجم في حالة المحرك احادي المرحلة، فإن هذا لا يستتبع زيادة السعر بالضرورة في حالة المحركات القياسية كسرعة القدرة بالحصان (التي تستخدم في الأغراض العامة)، وذلك بسبب الإنتاج الكبير العدد من هذه المحركات.

مقياس سرعة الدوران (أو التاكومتر) العامل على تيار متردد :

(A. C. Tachometer)

وهو في الواقع عبارة عن محرك تأثيري ثنائي المرحلة، يستخدم في مجال

التنظيم الآلي، عندما نحتاج إلى قياس السرعة الزاوية لعمود إدارة من خلال ضغط متردد ثابت التردد، تتوقف قيمته على هذه السرعة. ويتكون التاكومتر في أبسط صورة من عضو ثابت يحتوى على ملفين m ، a متعامدين فراغيا، وعضو دائر من نوع القفص السنجاني. ويطلق على الملف الرئيسي m اسم المجال الثابت (fixed field) أو مجال المراجع (Reference field)، ويوصل إلى ينبوع ضغط متردد ذى ضغط مناسب ثابت القيمة والتردد. ويطلق على الملف المساعد α اسم المجال المنظم (Control field)، ويمكن أن يتولد فيه ضغط له نفس تردد ضغط المجال الثابت.

ونظرا لتعامد المجالين الثابت والمنظم نتوقع أن يكون معامل التأثير المتبادل بينهما (coefficient of mutual Coupling) مساويا للصفر. وهذا صحيح عندما يكون العضو الدائر ثابتا. ففي هذه الحالة، إذا نظرنا إلى التاكومتر على أساس مماثلته للمحرك التأثري احادى المرحلة، نجد أن المجالين الأمامى والخلفى اللذين ينشئهما الملف الرئيسي m يكون تأثيرهما متساويين ومتضادين بالنسبة للملف المساعد α . هذا ويجب أن يكون مفهوما لدينا، إلى جانب ذلك، أن الملف α يكون موصلا إلى مكبر (amplifier) ذى مقاومة مدخل كبيرة نسبيا، مما يمكننا من النظر إليه على أنه ملف مفتوح، واعتبار رد فعله على الملف الرئيسي مهملا.

عندما يكون تاكومتر التيار المتردد دائرا بسرعة معينة، يعمل الملف الرئيسي m على نمط الملف الرئيسى في المحرك التأثري احادى المرحلة، فيكون له معاوقة مدخل للمجال الأمامى Z_f ، ومعاوقة مدخل للمجال الخلفى Z_b . وتتولد في هذا الملف القوة الدافعة الكهربية $E_{mf} = 0.5 I_m Z_f$ نتيجة دوران المجال الأمامى بالنسبة له في نفس الاتجاه، كما تتولد فيه أيضا القوة الدافعة الكهربية $E_{mb} = 0.5 I_m Z_b$ نتيجة دوران المجال الخلفى بالنسبة له في عكس الاتجاه. فإذا كانت النسبة بين عدد اللفات الفعالة بين الملف المساعد α إلى عدد

اللفات الفعالة في الملف الرئيسي m هو N [عدد اللفات الفعالة هو حاصل ضرب عدد اللفات في معامل اللف $(\frac{K_{wa}}{K_{wm}} \frac{T_a}{T_m})$] نجد أن القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في الملف m بفعل المجال الأمامي هي :

$$E_{af} = J N E_{mf} = J N I_m \times 0.5 Z_f \quad (٤-٢١)$$

وهذا يعني أن E_{of} متقدمة على E_{mf} بزاوية مقدارها $\frac{\pi}{2}$ ، والسبب في ذلك هو أن الملف α يتخلف بزاوية فراغية مقدارها $\frac{\pi}{2}$ عن الملف m ، فيكون مرور المجال الأمامي عليه أثناء دورانه قبل مروره في الملف m بما يعادل هذه الزاوية، فينتج في الملف α قوة دافعة كهربائية متقدمة عن تلك التي تنتج في الملف m بزاوية $\frac{\pi}{2}$.

ونظراً لأن المجال الخلفي يمر أثناء دورانه على الملف m بما يعادل الزاوية $\frac{\pi}{2}$ قبل مروره على الملف α ، تكون القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في الملف α متخلفة عن القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في الملف m ، فنجد أن العلاقة بين E_{mb} و E_{ab} هي

$$E_{ab} = -j N E_{mb} = -j N I_m \times 0.5 Z_b \quad (٤-٢٢)$$

وتكون القوة الدافعة الكهربائية المحصلة المتولدة في الملف α بفعل المجالين الأمامي والخلفي هي :

$$E_a = \frac{1}{2} j N I_m (Z_f - Z_b) \quad (٤-٢٣)$$

عندما يكون العضو الدائر في التاكومتر ساكناً فإن $Z_f = Z_o$ ويكون الضغط

المتولد على طرفي الملف α مساويا للصفر . وكلما ازدادت سرعة العضو الدائر، تكبر قيمة Z_r وتقل قيمة Z_b ، بحيث يكون الفرق بينهما متناسبا مع السرعة، وتصبح القوة الدافعة الكهربية E_a المأخوذة من الملف α أيضا متناسبة مع السرعة، وهو الأساس في طريقة عمل التاكومتر كما سبقت الإشارة إليه .

المحرك التآثيرى ثنائى المرحلة : The two phase induction motor

تحتل مجارى العضو الثابت فى هذا المحرك مجموعتان من الملفات، تكون كل مجموعة منها مرحلة قائمة بذاتها، وتكون مجارى كل مجموعة متعامدة فراغيا مع مجارى المجموعة الأخرى، أى يفصل بينها زاوية فراغية (space angle) مقدارها $\frac{\pi}{2}$ أو 90° (راجع الملفات ثنائية المراحل فى كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربائية صفحة ٢٨) . وتوصل كل مجموعة من الملفات إلى مرحلة من مرحلتىذبوع ثنائى المرحلة (Two phase supply). وعندما يكون هذا الذبوع متزنا (balanced)، فإن الضغط فى المرحلتين يكون متساويا، وتقع بينهما زاوية اختلاف مرحلى زمنية (time phase angle)

مقدارها $\frac{\pi}{2}$ أو 90° درجة أيضا، وفى هذه الحالة يتكون مجال مغناطيسى دأر ذو اتساع متغير، بخلاف المجال الميناطيسى الدأر فى حالة المراحل الثلاثية، الذى يكون ثابت الاتساع . وإذا كان طول الضغط المرحلى المتساوى هو V ، فانه يمكن التعبير عن الضغط المتزن فى المرحلتين V_1 و V_2 على النحو التالى :

$$V_1 = V \quad . \quad V_2 = j V \quad (٢٤ - ٤)$$

أما إذا كان الذبوع غير متزن، بأن يكون الضغط فى المرحلة الأولى V_1 مختلفا فى الطول عن الضغط فى المرحلة الثانية V_2 ، وكانت الزاوية بينهما مختلفة عن 90° درجة، فإن خير ما نفعله فى هذه الحالة هو استخدام المركبات

المماثلة للحصول على مجموعتين من المركبات ، وهى مجموعة مركبات التعاقب المرحلى الموجب ، ومجموعة مركبات التعاقب المرحلى السالب . ومن الواضح أن مجموعة مركبات التعاقب المرحلى الموجب تحتوى فى هذه الحالة على مرتحلين (2 phasors) طول كل منهما V_p والزاوية بينهما 90° ، يكون V_{p1} متقدما بها على V_{p2} (مجموعة ثنائية مترتبة ذات تعاقب موجب على نمط المجموعة الثلاثية المترتبة ذات التعاقب الموجب) ، كما أن مجموعة مركبات التعاقب المرحلى السالب تحتوى على مرتحلين طول كل منهما V_n والزاوية بينهما 90° درجة أيضا ، ولكن يكون V_{n2} متأخرا بها على V_{n1} .

$$V_1 = V_{p1} + V_{n1} \quad , \quad V_2 = V_{p2} + V_{n2}$$

$$V_{p1} = V_p \quad , \quad V_{p2} = j V_p$$

$$V_{n1} = V_n \quad , \quad V_{n2} = -j V_n$$

$$V_1 = V_p + V_n \quad , \quad V_2 = j V_p - j V_n \quad (٤-٢٥)$$

ويمكن الحصول على كل من V_p و V_n بدلالة V_1 و V_2 (وهما المعطيان غالباً فى الأصل) بعمل التحويلات الرياضية اللازمة على نحو مماثل لما فعلناه فى المراحل الثلاثية فنجد أن :

$$V_p = \frac{1}{2} (V_1 - j V_2) \quad , \quad V_n = \frac{1}{2} (V_1 + j V_2) \quad (٤-٢٦)$$

ونستطيع أن نحصل على العلاقات الخاصة بالتيارين I_1 ، I_2 ، ومجموعتي التعاقب المرحلى لهما بطريقة مماثلة ، فنجد أن :

$$I_1 = I_p + I_n \quad , \quad I_2 = j I_p - j I_n \quad (٤-٢٧)$$

$$I_p = \frac{1}{2} (I_1 - j I_2) \quad , \quad I_n = \frac{1}{2} (I_1 + j I_2) \quad (٤-٢٨)$$

وتساعد هذه العلاقات عادة فى التحليلات الخاصة بتشغيل محركات التحكم ثنائية المرحلة (Two phase Control motors) .
مثال محلول :

A Small 2 - phase , 2 pole induction motor has the following constants in the main winding at 60 HZ :

$$R_1 = 357 \text{ ohms} , X_1 = X_2 = 50 \text{ ohms}$$

$$R_2 = 255 \text{ ohms} , X_0 = 920 \text{ ohms}$$

The main and auxiliary Windigs have the Same number of turns. This motor is used as a tachometer with 60 HZ reference Voltage applied to its main Winding Compute the speed voltage sensitivity in volts output / voltinput / radian per sec. near zero speed . Also Compute the phase angle of the output voltage relative to the input voltage.

يكون حل هذه المسألة باستخدام الدائرة المكافئة للمحرك التأثري أحادي المرحلة شكل (٩ - ٤ ب)، وبالقوانين الخاصة بهذا المحرك التي سبق استنباطها في هذا الشأن [المعادلات من (٣ - ٤) إلى (٤ - ٦)]، وذلك بالنسبة للملف الرئيسي، الذي نشير إلى عضوه الثابت بالدليل m أو ١. ولكي نحقق شرط التواجد بالقرب من سرعة الصفر (حالة السكون) نعتبر أن معامل الانزلاق s قريب من الواحد الصحيح ونفترض له القيمة ٠.٩، فتكون قيمة $(2 - s)$ هي ١.١ :

$$0.5 R_f = \frac{127.5}{0.9} \times \frac{(460)^2}{\left(\frac{127.5}{0.9}\right)^2 + (25 + 466)^2} = 117.5 \text{ ohms}$$

$$\begin{aligned} 0.5 X_f &= 460 \times \frac{\left(\frac{127.5}{0.9}\right)^2 + 25(25 + 460)}{\left(\frac{127.5}{0.9}\right)^2 + (25 + 460)^2} \\ &= 460 \times \frac{2050 + 12125}{255050} = 58 \text{ ohms} \end{aligned}$$

$$5 R_b = \frac{127.5}{1.1} \times \frac{(460)^2}{\left(\frac{127.5}{1.1}\right)^2 + (25 + 460)^2} = 98.7 \text{ ohms}$$

$$0.5 X_b = 460 \times \frac{\left(\frac{127.5}{1.1}\right)^2 + 25(25 + 460)}{\left(\frac{127.5}{1.1}\right)^2 + (25 + 460)^2}$$

$$= 460 \times \frac{13440 + 12125}{248440} = 47.5 \text{ ohms}$$

$$Z_i = Z_1 + 0.5 Z_f + 0.5 Z_b = (R_1 + 0.5 R_f + 0.5 R_b)$$

$$+ j (X_1 + 0.5 X_f + 0.5 X_b)$$

$$= (357 + 117.5 + 98.5) + j (50 + 58 + 47.5)$$

$$= 573 + j 155.5 = 594 \angle 15^\circ 12'$$

إذا كانت قيمة التيار في الملف الرئيسى الموصل إلى الينبوع عند الانزلاق المعطى I_m ، وكانت نسبة عدد اللفات في الملفات a إلى الملفات m هي $N=1$ كما هو معطى، نجد أن مقدار القوة الدافعة الكهربية E_a المتولدة في ملفات التاكومتر a هي، على حسب المعادلة (١٨ - ٤).

$$E_a = \frac{1}{2} j N I_m (Z_f - Z_b) = \frac{1}{2} j I_m (Z_f - Z_b)$$

$$= j I_m [(117.5 - 98.5)^2 + j (58 - 47.5)^2]$$

$$= j I_m \times 21.68 \angle 28^\circ 54'$$

وهذا هو ما يعتبر ضغط المخرج للتاكومتر V_0 ، أما ضغط المدخل V_i فهو عبارة عن $I_m Z_i$ ، وبذلك نجد أن الحساسية المطلوبة لنسبة ضغط المخرج إلى ضغط المدخل في هذا التاكومتر، لكل درجة نصف قطرية (per radian/sec)، عبارة عن:

$$\frac{V_0}{V_i} \times \frac{1}{\omega} = \frac{I_m (Z_f - Z_b)}{I_m \times Z_i} \times \frac{1}{\omega}$$

$$= \text{Sensitivity required}$$

٢٠٩

$$\omega = \omega_s (1 - S) \quad , \quad \omega_s = 2 \pi f = 100 \pi$$

$$\omega = 100 \pi \times 0.1 = 10 \pi$$

$$\text{Sensitivity} = \frac{21.68}{594 \times 10 \pi} = 0.00116$$

$$\begin{aligned} \text{phase angle between } V_0 \text{ and } V_i &= 90 + 28^\circ 54' - 15^\circ 12' \\ &= 103^\circ 42' \end{aligned}$$

وذلك لأن :

$$V_0 = j I_m \times 21.68 \quad | \underline{84^\circ 25'} = 21.68 I_m \quad | \underline{90 + 28^\circ 54'}$$

الباب الخامس

تصميم المحركات التأثيرية ثلاثية المراحل

Design of 3 - phase Induction Motors

يتم تصميم المحركات التأثيرية ثلاثية المراحل على نفس المنوال ، واتباع خطوات مشابهة لتلك التي سبق شرحها في حالي الآلات التزامنة وآلات التيار المستمر . ولا تختلف فلسفة التصميم في هذه الحالة عما سبق شرحه أيضا من حيث ضرورة الحصول على مستوى جيد لأداء الآلة ، باعتبار منحنيات خواص تشغيلها ، مع مراعاة أن تكون تكاليف إنتاجها ، وتشغيلها على مدى عمرها ، بأقل قيمة ممكنة . ويستوجب ذلك ، كما سبق أن رأينا ، تحديد قيمة مناسبة لكل من الحمل النوعي الكهربائي ، والحمل النوعي المغناطيسي ، على أساس الخبرات السابقة في مجال تصميم هذه الآلات ، حيث يمكن ، بناء على ذلك ، تحديد الأبعاد الرئيسية للآلة ، باستخدام المعادلة التي تربط بين كل هذه المتغيرات . وهذه المعادلة تشبه في تكوينها المعادلتين المناظرتين ، اللتين سبق أن استنبطناهما في حالي الآلات التزامنة ، وآلات التيار المستمر ، ونستطيع أن نستنبطها بنفس الأسلوب .

(١ - ٥) حساب الأبعاد الرئيسية للمحرك :

نفرض أن المطلوب تصميم محرك تأثيري ثلاثي المراحل ، ذي قدرة مخرج معينة بالحصان نرمز إليها بالرمز HP . إذا تذكرنا ما سبق أن قلناه في مناسبة سابقة ، من أن العضو الثابت للمحرك التأثيري لا يفترق في ملامحه الرئيسية عن العضو الثابت للمحرك التزامن ، ندرك على الفور أننا نستطيع بكل تأكيد الاستفادة من المعادلات والوسائل الخاصة بتصميم المحرك التزامن ، مما يسهل علينا كثير من

الأمر في هذه الحالة . وهذا يعني أننا نستطيع الاستفادة من المعادلة (١-٦) الخاصة بإيجاد الأبعاد الرئيسية للآلة المتزامنة (صفحة ٢٩٠ كتاب نظريات وتصميم الآلات ، كهربية) وذلك بعد إيجاد KVA_i بدلالة HP ، مع تحديد معامل القدرة ومعامل الجودة للمحرك ، باللجوء إلى التصميمات السابقة ، حيث نجد أن :

$$KVA_i = \frac{HP \times 0.746}{\eta \times \cos \phi} = 0.183 AC \times B_a \times k_w$$

$$\times 10^{-11} \times D^2 l_i \times n_s$$

$$\frac{HP}{n_s} = 0.245 AC \times B_a \times \eta \times \cos \phi \times k_v \times 10^{-11}$$

$$\times D^2 l_i$$

$$= C_0 D^2 l_i \quad (٥-١)$$

$$C_0 = 0.245 AC \times B_a \times \eta \times \cos \phi$$

$$\times k_w \times 10^{-11} \quad (٥-٢)$$

C_0 هو ثابت المخرج للآلة ، ويتطلب حسابه معرفة قيمة كل من $D^2 l_i$ ، B_a ، AC ، η ، $\cos \phi$ ، k_w مسبقاً ، لكي يمكن الحصول على قيمة $D^2 l_i$ الخاصة بالآلة . ويتم الحصول على قيمة C_0 أو تحديد القيم المطلوبة لحسابها باستخدام المنحنيات التي تعطى قيمة كل منها ، كما تم الحصول عليها في آلة مشابهة سبق تصميمها ، وتعمل بصورة مرضية . وهذا هو ما نطلق عليه اللجوء إلى الخبرة السابقة (previous practice) . ولكل مصنع ، بطبيعة الحال ، خبرته الخاصة به ، ومنحنياته التي يحصل عليها في هذا السيل . وتتوزع هذه المنحنيات على حسب المتغيرات الرئيسية في الآلة ، وبخاصة عدد الأقطاب . وفيما يلي نعطي مجموعات القراءات التي يمكن الاستفادة بها الرسم بعض هذه المنحنيات ، وعندما لا تنفي هذه المنحنيات بضالتنا المنشودة بالضبط نلجأ إلى

استنباط المنحنى المطلوب باستخدام أقرب المنحنيات إليه ، وذلك بتطبيق الطرق الرياضية المعروفة في هذه المضمار، والتي يطلق عليها الاستقطاب الداخلى أو الممتد (interpolation or extrapolatin) فى حالة المحركات ذات السرعات العالية (عدد صغير من الاقطاب) يمكن الحصول على كل من منحنى معامل القدرة ومعامل الجودة عند قدرات المخرج المختلفة بالحصان القرملى من الجدول الآتى .

| القدرة | صفر | ٥ | ٢٠ | ٤٠ | ٨٠ | ١٢٠ | ١٦٠ | ٢٢٠ |
|--------------|-----|------|------|-------|-------|-------|-------|------|
| معامل القدرة | صفر | ٠.٨٩ | ٠.٩٢ | ٠.٩٣٥ | ٠.٩٤ | ٠.٩٤٥ | ٠.٩٤٨ | ٠.٩٥ |
| معامل الجودة | صفر | ٠.٨٩ | ٠.٩١ | ٠.٩٢ | ٠.٩٣٥ | ٠.٩٤٢ | ٠.٩٤٨ | ٠.٩٥ |

والجدول الآتى يعطى القيم المعتادة عند السرعات المتوسطة (عدد متوسط من الاقطاب) .

| القدرة | صفر | ٥ | ٢٠ | ٤٠ | ٨٠ | ١٢٠ | ١٦٠ | ٢٢٠ |
|--------------|-----|------|------|------|-------|-------|------|-------|
| معامل القدرة | صفر | ٠.٨٤ | ٠.٨٧ | ٠.٨٩ | ٠.٩ | ٠.٩٠٥ | ٠.٩١ | ٠.٩١٥ |
| معامل الجودة | صفر | ٠.٨٦ | ٠.٨٨ | ٠.٩ | ٠.٩١٥ | ٠.٩٢٥ | ٠.٩٣ | ٠.٩٣ |

والجدول الآتى يعطى القيم عند السرعات المنخفضة (عدد كبير من الاقطاب) .

| القدرة | صفر | ٥ | ٢٠ | ٤٠ | ٨٠ | ١٢٠ | ١٦٠ | ٢٢٠ |
|--------------|-----|------|------|-------|-------|-------|------|-------|
| معامل القدرة | صفر | ٠.٧٤ | ٠.٧٨ | ٠.٨ | ٠.٨٢٥ | ٠.٨٣٥ | ٠.٨٤ | ٠.٨٤٥ |
| معامل الجودة | صفر | ٠.٧٥ | ٠.٨ | ٠.٨٢٥ | ٠.٨٣٥ | ٠.٨٧ | ٠.٨٨ | ٠.٨٨٥ |

هذا وتجدر بنا الإشارة ، بهذه المناسبة ، إلى أننا نسلك هنا سبيلا تعليميا محضاً، بمعنى أننا نهدف إلى تعليم الطالب النظريات الأساسية الخاصة بطرق التصميم . أما في الحياة العملية ، فإن الاستفادة من التجارب والخبرة السابقة تؤدي إلى انتهاج سبل خاصة في الحصول على الآلة ذات الأبعاد والملاخ المناسبة ، دون التقيد بالتفصيلات النظرية لطرق التصميم المستنبطة بالاسلوب العلمى . مثال ذلك اللجوء إلى تحديد اطرار قياسية (Standard Frames) للآلة، وهى عبارة عن نماذج من الحديد خاصة بالعضوين الثابت والدائر، ذات ابعاد وملاخ متنوعة تنوعاً شاملاً ، بحيث يمكن فى العادة تحديد واحد من هذه الاطرار ، وتوفير الملفات على كل من العضوين الثابت والدائر ، لكي نحصل فى النهاية على الآلة المطلوبة . وبديهي أن الآلات الحاسبة الالكترونية تقوم الآن ، فى هذا المضمار ، بدور كبير . ولكن لاشك أن البرامج التى يلزم اعدادها ، لكي يمكن للآلات الحاسبة الالكترونية أن تعطى بها النتائج الصحيحة ، تستلزم إلى جانب الخبرة بفن استخدام هذه الآلات ، معرفة دقيقة بطرق التصميم الأساسية ، واسلوب التحكم فى متغيراتها، للحصول على أحسن النتائج ، وهو ما نهدف إليه أساساً من تعليم النظريات الخاصة بالتصميم . وسنرى فى نهاية الجزء ، الذى سيتناول حل مسائل التصميم على الحاسبات الالكترونية فى نهاية هذا الباب ، أن إعداد هذه البرامج يحتاج إلى إعادة تنظيم معادلات وعلاقات التصميم بحيث تقل المتغيرات فيها إلى أقل عدد ممكن . وهذا يستلزم بطبيعة الحال اجادة فن التصميم مسبقاً، بالطرق التقليدية. فى الآلات الصغيرة نجد أن قيمة AC تكون حوالى (200 amp-cond/cm) وقيمة B_a تكون حوالى 5000 جاوس و $k_w = 0.96$. وتكون قيمة $\cos \phi$ حوالى 0.7 وقيمة η حوالى 0.7 .

وفى الآلات الكبيرة تصل هذه القيم إلى :

$$AC = 550 , B_a = 5700 , k_w = 0.92 , \cos \phi = 0.9 , \\ \eta = 0.9$$

وكما سبق ذكره يمكن الحصول على القيم المطلوبة بالرجوع إلى الآلات التي سبق تصميمها، على أساس الفروض المعطاة بالنسبة للآلة الجديدة .

لكي يمكن فصل D عن I_i من القيمة $D^2 I_i$ التي نحصل عليها من المعادلة (٥ - ١) نستعين ، كما سبق أن فعلنا في آلات التيار المستمر والآلات المتزامنة ، بقيمة مناسبة للنسبة $\lambda = \frac{I_i}{\tau_p}$ ، حيث τ_p هي الخطوة القطبية للمحرك . وتتغير قيمة هذه النسبة على حسب حجم المحرك وسرعته، وتكون بالتقريب كما يلي :

في المحركات الكبيرة ذات السرعات المنخفضة $2.0 \rightarrow 1.0 = \lambda$

في المحركات الكبيرة ذات السرعات المرتفعة $1.8 \rightarrow 0.9 = \lambda$

في المحركات الصغيرة التي تصل قدرتها إلى مائة حصان تقريبا

$1.0 \rightarrow 0.6 = \lambda$

بعد الحصول على كل من قطر الآلة D وطولها I_i يقسم الطول I_i إلى أجزاء تكون بينها فتحات التهوية على نفس المنوال كما فعلنا في الآلة المتزامنة (راجع كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربائية صفحة ٢٩٤) .

(٢ - ٥) اختيار عدد المجارى وتصميم الملفات :

كما هو الحال في الآلات المتزامنة يستخدم نوعان من المجارى ، وهي المجارى المفتوحة (open slots) ، والمجارى نصف المغلقة (Semi - closed) (راجع كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربائية صفحة ٢٩٥) . وعموماً فإن المجارى نصف المغلقة تستخدم مع الآلات الصغيرة والآلات متوسطة الحجم، عندما يكون الضغط منخفضاً . ويمكن استخدام المجارى المفتوحة في الآلات الكبيرة وعندما يكون الضغط عالياً (يزيد على ٣٠٠٠ فولت) . ويكون لف العضو الثابت بأحدى الطرق الآتية :

(أولا) أن تعد الملفات على هياكل (fromers) مناسبة ، ويتم اسقاطها في المجرى بدفع موصل بعد الآخر من خلال الفتحة نصف المغلقة .

(ثانيا) سحب السلك داخل المجرى ، ثم ترتيب الاسلاك معا في ملفات .

(ثالثا) اعداد الملفات على هياكلها ، ثم اسقاط الملفات بزيها في المجارى المفتوحة (open slots) .

ويتم تحديد عدد اللفات في المرحلة الواحدة للعضو الثابت T_{ph} من معادلة القوة الدافعة الكهربائية ، ثم يحدد عدد الموصلات في كل مجرى باعتبار أن عدد الموصلات الكلية في العضو الثابت عبارة عن $Z_1 = 6 T_{ph}$ ، وذلك بعد تحديد عدد المجارى ، هذا ويتوقف عدد الموصلات الكلى على ضغط الآلة ، وطريقة توصيل الملفات في العضو الثابت نجمة أو دلتا . ففي الآلات التي تستخدم ضغطا عاليا وتكون قدرتها صغيرة نجد أن توصيلة الدلتا تحتاج إلى حوالي ٧٣٪ زيادة في عدد الموصلات عن توصيلة النجمة المناظرة . ولكن توصيلة الدلتا تتيح استخدام مفتاح نجمة دلتا لبدء الآلة فى هذه الحالة . لذلك فإن الاتجاه ينحوي إلى استخدام توصيلة الدلتا مع الضغوط المنخفضة ٢٢٠ ، ٣٨٠ ، ٥٠٠ فولت ، بينما قد يفضل استخدام توصيلة نجمة مع الضغط ٣٨٠ فولت ، حتى يمكن تشغيل الآلة بنفس القدرة على ضغط ٢٢٠ فولت ، بعد تحويل توصيلها إلى دلتا .

هذا ويندر بالنسبة للآلات الكبيرة ذات الضغوط المرتفعة استخدام توصيلة الدلتا ، وحينئذ فإن توصيلة النجمة هي السائدة فى هذه الحال ، لى لا تنخفض قيمة معامل الملء للمجرى بسبب ازدياد عدد الموصلات ، وبالتالى ازدياد مقدار المواد العازلة فى المجرى (معامل الملء فى المجرى هو نسبة مساحة النحاس الكلية فى المجرى إلى مساحة فراغ المجرى) . وهذا هو

أحد الأسباب الرئيسية الداعية إلى الاتجاه إلى استعمال وسائل بدء أخرى غير مفتاح نجمة دلتا .

(٣ - ٥) عدد المجارى على العضو الثابت :

يكون تحديد عدد المجارى فى العضو الثابت (المنتج) على أساس اختيار عدد مناسب من المجارى لكل قطب ولكل مرحلة ، وهو الذى نشير إليه دائماً بالرمز q_1 (Slots / pole / phase) . وتكون قيمة q_1 عادة ما بين ٣ ، ٤ . ونحاول على قدر الإمكان تجنب القيمة ١ أو ٢ . ويمكن زيادة قيمة q_1 عن ٤ فى الآلات التى تكون فيها قيمة القدرة لكل قطب كبيرة ، وتكون أقصى قيمة لـ q_1 هى ٩ فى الآلات الكبيرة التى يكون عدد أقطابها اثنين فقط . هذا ويمكن المراجعة على قيمة q_1 المختارة بإيجاد قيمة خطوة المجرى (Slot pitch) τ_{s1} التى تتراوح عادة ما بين ٢ مم ٣ سم فى الآلات ذات الضغط المرتفع . ويمكن أن تتراوح هذه القيمة بين ١٥ مم ٢ سم فى الآلات ذات الضغط المنخفض والخطوة القطبية الصغيرة . وعموما تقع القيمة الشائعة ما بين ٢ مم ٢٥ سم . ويكون إيجاد τ_{s1} على نفس المنوال كما فعلنا فى آلات التيار المستمر والآلات المتزامنة ($\tau_{s1} = \frac{\pi D}{S_1}$) حيث S_1 عدد المجارى فى العضو الثابت ويساوى q_1 (6p

(٤ - ٥) أبعاد المجرى والملفات :

يكون تصميم المجرى فى العضو الثابت على أساس ما يحتويه من موصلات $\frac{z_1}{s_1}$ ، وذلك بفرض قيمة مناسبة لكثافة التيار s التى تتراوح بين ٣ و ٦ أمبير لكل ملليمتر مربع ، على حسب كفاءة التهوية فى الآلة وقيمة AC ، بحيث لا تتعدى قيمة حاصل ضرب AC فى كثافة التيار الحد الذى سبقت الإشارة إليه فى حالة الآلات المستمرة والمتزامنة ، وهو فى هذه الحالة ٢٠٠

نحصل على مساحة مقطع المرصل بقسمة قيمة التيار المرحلى على كثافة التيار. ويتحدد شكل المقطع إما مستدير إذا استطعنا الحصول على سلك قياسى مستدير المقطع (standard wire guage) ، بحيث لا يزيد قطر السلك عن ٣ مم عادة، لى يمكن ثنيه وتشكيله باليد، أو يكون المقطع مستطيلاً ، وتتحدد أبعاده بنفس الطريقة التى اتبعت فى حالات الآلات المتزامنة.

فإذا كان المقطع مستديراً يزداد قطر الموصل بعازله من ٠.١ إلى ٠.١٥ مم كزيادة محتملة نتيجة لتشريب الملفات بالورنيش وللمقابلة لفرق حسابات التصميم ولسهولة نزول الملفات فى المجارى والفضضة . وفى حالة الأسلاك ذات المقطع المستطيل تكون الزيادة فى كل من بعدين من ٠.٢ إلى ٠.٦ مم نتيجة للقه بالعازل ، ثم يزداد ما قيمته ٠.١٤ مم تقريباً لكل من البعدين، لنفس الأسباب السابقة.

نحصل على أبعاد المجرى بعد ترتيب الموصلات المعزولة فى المجرى وعمل بطانة للمجرى بسلك من ٠.١ إلى ٠.١٥ مم من عازل الميكانيك ، وذلك فى حالة الملفات الجاهزة المعدة مسبقاً على هيكل (Formed Coils) ، حيث تكون هذه الملفات معزولة عزلاً جيداً قبل وضعها فى المجرى .

أما بالنسبة للملفات المستخدمة فى الآلات الصغيرة ذات الضغط المنخفض، حيث يتم ربط الملفات معاً دون النظر إلى عزلها، وكذلك فى حالة الملفات اليدوية (أى التى تشكل يدوياً بدون استخدام هيكل)، فإن بطانة المجرى تكون أكثر سمكاً من ذلك ، وتتراوح ما بين ٠.٥ إلى ٠.٨ مم.

يتم تحديد أبعاد المجرى بطريقة حسابية فى حالة الملفات الهيكلية ، كما سبق أن فعلنا فى حالة الآلات المتزامنة والآلات المستمرة ، حيث يكون بعد جانب الملف المعزول محددين تماماً .

أما فى حالة الملفات اليدوية التى تتكون من أسلاك مستديرة حيث يتم إسقاط

الاسلاك داخل المجارى موصلاً بعد موصل من خلال الفتحة نصف المغلقة ، فتتبع الطريقة الآتية : يرسم المجرى بالشكل المقترح بمقياس رسم كبير (١٠ : ١ عادة) وترسم البطانة للمجرى بزيادة ١٠٪ في سمكها ، ثم ترسم مقاطع الموصلات المعزولة داخل المجرى بزيادة ١٥ مم (١٥ مم في الرسم) في قطر كل منها ، بحيث تملأ المجرى دون فراغات . ونظراً لأننا لا نتوقع أن يكون ترتيب الأسلاك الحقيقي في المجرى مطابقاً تماماً لما جاء في الرسم ، يجب ترك فراغا مقداره من ١ إلى ٢ مم (١٠ إلى ٢٠ مم في الرسم) لتغطية الاختلاف المرتقب . أما في حالة سحب الأسلاك داخل المجرى واحداً بعد الآخر ، فإن ذلك يجرى بعد ملء المجرى بأعواد من الخشب ينظر كل عود منها أحد الموصلات بحيث يتم سحب أحد الأعواد ، وإدخال أحد الموصلات وراءه مباشرة لكي يحل محله . وفي هذه الحالة يمكننا أن نطمئن إلى الاستفادة من فراغ المجرى بأكمله في استيعاب الموصلات .

ويلاحظ أن فتحة المجرى يجب أن تسمح في هذه الحالة بمرور السلك مع وجود بطانة المجرى ، لذلك يكون عرض فتحة المجرى مساوياً لقطر السلك المعزول بالإضافة إلى ضعف سمك عازل بطانة المجرى ، مع زيادة من ٣ مم . إلى ٥ مم .

هذا وفي حالة الملفات التي يتم اسقاط موصلاتها في المجرى يمكن أن يكون الملف من النوع ذي الطبقتين (Double layer winding) ، أما في حالة الملفات التي يتم سحب موصلاتها داخل المجرى ، فإنها تكون عادة من النوع ذي الطبقة الواحدة (Single layer winding) . ولذلك فإن النوع الأول من الملفات يمتاز عن هذا النوع الأخير بأنها يمكن أن تكون ملفات وترية ذات طبقتين (Double layer chorded winding) . وهي تستخدم في الآلات الصغيرة عندما يكون المجرى محتوياً على عدد كبير من الأسلاك الرفيعة . كما يفضل استخدام هذا النوع من الملفات أيضاً في العضو الدائر ذي الحلقات

الانزلاقية لامتيازها من الناحية الميكانيكية ، حيث يمكن استخدامها بدون رموس الملفات . وتستخدم جميع هذه الملفات مع الضغوط المنخفضة فقط .

تستخدم الملفات نصف المجزأة (half formed coils) فى الآلات ذات الضغط المرتفع عندما تكون المجارى نصف مغلقة (semi - closed) ، وهذا يكون على سبيل المثال فى حالة العضو الدائر ذى السرعة المنخفضة . وكذلك عندما تكون قيمة القدرة لكل قطب صغيرة فى الآلات التى يكون فيها طول الفجرة الهوائية كبيراً ، نتيجة للاعتبارات الميكانيكية ، ولا يمكن زيادة طولها الفعال أكثر من ذلك (عند استخدام المجارى المفتوحة) .

تستخدم الملفات الجاهزة (الهيكليّة أو المعدة على هياكل) غالباً عندما يكون اللف من النوع مزدوج الطبقة (Double - layer winding) . وتكون هذه الملفات وتربية فى معظم الاحوال ، حيث تم الاستفادة من ذلك ميكانيكياً وكهربائياً .

بعد أن يتم تحديد أبعاد المجرى ، والسنة بناء على قيمة معينة للخطوة تعمل مراجعة على كثافة الخطوط المغناطيسية فى السنة ، وذلك على مقطعها المنتظم لو كانت متوازية الجانبين (parallel sided tooth) أو على مقطعها الذى يعد بمقدار ثلث ارتفاعها عن أضيق مقطع فيها ، لو كان المجرى متوازى الجانبين . ولا يجب أن تزيد قيمة كثافة الخطوط فى هذه الحالة عن ١٥٠٠٠ - ١٦٠٠٠ جاوس .

هذا ويلاحظ أن أبعاد المجرى تتوقف فى النهاية على قيمة القطر وعدد المجارى معاً .

فبالنسبة لعمق المجرى فإنه يكون صغيراً نسبياً فى المحركات بطيئة السرعة عند استخدام ملفات ذات طبقة واحدة ومجارى نصف مغلقة . ويزداد

العمق حتى يصل إلى حوالي ١٤ ملليمتراً عند استخدام ملفات ذات طبقتين ومجاري مفتوحة. أما في المحركات ذات السرعات الكبيرة فتكون المجاري أعمق من ذلك، وخصوصاً عندما يكون القطر كبيراً. وفي الآلات الصغيرة يتراوح عمق المجرى بين ١٥ و ٢٥ ملليمتراً، وتكون المجاري في أغلب الأحيان نصف مغلقة. ويغلب استعمال المجاري المفتوحة حالياً عندما يزيد القطر عن ٣٥٠ ملليمتراً. وفي حالة تساوي الاقطار نجد أن الآلات ذات الاقطاب التي تتراوح ما بين ٢ و ٦ تمتلك مجاري أعمق من تلك التي تتراوح عدد أقطابها من ٨ إلى ١٤.

أما بالنسبة لعرض المجرى فإنه يتوقف على خطوة المجرى. وفي العادة نحس السنة بنصف هذا العرض، بينما يترك النصف الآخر للمجرى، وبذلك نكون قد قسمنا الشغل بالتساوي تقريباً بين الدائرتين المغناطيسية والكهرية للآلة. ونظراً لما يعنيه وجود العازل من فقد في الحيز بالنسبة للدائرة الكهرية، فإننا نجعل عرض المجرى عند منتصف ارتفاعه أكبر قليلاً من عرض السنة، وبخاصة عند استخدام الملفات المجزأة.

وتتراوح قيمة نسبة ارتفاع المجرى إلى عرضه بين ٣ و ٥ عادة. هذا ويمكن الاستفادة من هذه العلاقات بتحديد قيمة مبدئية لارتفاع المجرى، ثم تحديد عرضه، وبالتالي قيمة خطوة السنة τ_{s1} ، وأخيراً مقدار q_1 بمعرفة قطر الآلة.

(٥ - ٥) الثغرة الهوائية: (Air gap)

بالنسبة للخواص الكهرية للآلة يراعى أن يكون طول الثغرة الهوائية أقل ما يمكن. ذلك لأن هذا الطول إذا زاد يؤثر تأثيراً سيئاً على تيار المغطسة للمحرك، وبالتالي على معامل القدرة. أما من الناحية الميكانيكية، فإن تحديد طول الثغرة الهوائية للآلة يكون مرهوناً بالأمر التي تتعلق بتكوين الآلة من

الناحية الميكانيكية ، مثل نوعية الكراسى المستخدمة مع العضو الدائر، وكذلك طول الآلة ، حيث يراعى ألا يزيد تقوس (deflection) عمود الإدارة نتيجة ارتكازه على الكرسيين عن قيمة صغيرة جداً، لا تزيد عن ١٠٪ من طول الثغرة الهوائية بآية حال من الأحوال .

فيما يلي بعض القواعد التي يمكن تحديد الثغرة الهوائية δ على أساسها ، وهي تتعلق بالآلات ذات الأطوال العادية ، باعتبار جميع الأبعاد بالمليمتر :

• في المحركات الصغيرة من ١ - ٤٠ حصان نجد أن :

$$\delta = 0.5 + \frac{D}{1000} \quad 2p = 4 \rightarrow 12 \quad \text{(٣-٥) عندما يكون}$$

$$\delta = 0.3 + \frac{D}{666} \quad 2p = 2 \quad \text{(٤-٥) عندما يكون}$$

في المحركات المتوسطة والكبيرة الحجم (أكبر من ٤٠ حصان)

$$\delta = \frac{D}{1200} \left(1 + \frac{9}{2p} \right) \quad 2p = 2 \rightarrow 16 \quad \text{(٥-٥) عندما يكون}$$

وفي المحركات بطيئه الدوران عموماً نجد أن :

$$\delta = \frac{D}{1600} + 0.6 \quad 2p = 18 \rightarrow 56 \quad \text{عندما تكون}$$

وبالنسبة للمحركات التي تكون ذات ظروف تشغيل صعبة، يمكن زيادة طول الثغرة الهوائية بمقدار ٥٠٪. وسوف يؤدي ذلك بطبيعة الحال إلى التأثير على كل من معامل القدرة، ومعامل الجودة أيضا، للمحرك. هذا ويكون الحصول على طول الثغرة الهوائية الفعال، باستخدام معامل كارتير لكل من العضو الثابت والعضو الدائر وفتحات التهوية، على نفس المنوال كما فعلنا في آلات التيار المستمر وآلات التيار المتردد (راجع كتاب هندسة الآلات الكهربائية صفحة ٢٢٨ — ٢٣٤).

(٥ - ٦) عدد المجارى في العضو الدائر :

يكون اختيار عدد المجارى هو البداية في تصميم العضو الدائر للمحرك، وهي عملية تحتاج إلى كثير من الدقة، لما يرتبط بها من الصعوبات الخاصة بتشغيل المحرك، التي سبق ذكرها في الباب الثالث، مثل ظاهرة الحبس.

وعلى العموم فإن عدد المجارى لكل مرحلة وكل قطب q_2 في العضو الدائر، يمكن أن ترتبط بـ q_1 بالعلاقة الآتية، في حالة العضو الدائر ذي الحلقات الانزلاقية، إذا أردنا تفادي الصعوبات المشار إليها:

$$\left. \begin{aligned} q_2 &= q_1 \pm 1 && \text{في اغلب الاحيان} \\ q_2 &= q_1 \pm 2 && \text{ونادرا ما تكون} \end{aligned} \right\} \quad (٥ - ٦)$$

وفي حالة المحركات ذات القفص السنجاني نجد أن القاعدة المناظرة هي :

$$q_2 = q_1 \mp \frac{2}{3} \quad (٧ - ٥)$$

ويراعى أنه عندما يكون عدد المجارى في العضو الثابت كبيرا، فإننا نختار الإشارة السالبة، لتقليل عدد المجارى في العضو الدائر، بينما تستخدم الإشارة الموجبة عندما يقل عدد المجارى في العضو الثابت. وعلى سبيل المثال نجد أنه

في حالة المحركات ذات أربعة الأقطاب و $q_1 = 3$ فإن عدد المجارى في العضو الثابت يكون ٣٦ ، فنختار لذلك $q_2 = 3 - \frac{2}{3}$ حتى يصبح عدد المجارى في العضو الدائر ٤٤ .

ويمكن عموماً اتباع القواعد الآتية، بالنسبة للارتباط بين عدد المجارى في كل من العضوين الثابت والدائر :

(١) بالنسبة لظاهرة التماسك (Cogging) يكون تفاديهما يجعل الفرق بين عدد المجارى في العضو الثابت وعدد المجارى في العضو الدائر لا يساوى بأية حال من الأحوال $6p$ في حالة المحركات ثلاثية المراحل .

(٢) لتفادي ظاهرة الجبو (Crawling) يجب أن يكون الفرق بين عدد المجارى في العضو الثابت وعدد المجارى في العضو الدائر مساوياً بأية حال من الأحوال $2p$ أو $4p$ أو $10p$ للمحركات ثلاثية المراحل .

(٣) لتفادي الضجة في أثناء التشغيل لا يجب أن يكون الفرق بين عدد المجارى في العضو الثابت وعدد المجارى في العضو الدائر مساوياً بأية حال من الأحوال 1 أو 2 أو $(2p + 1)$ أو $(2p + 2)$.

ويكون عمق المجرى في العضو الدائر في الغالب أقل من عمق في العضو الثابت للآلة. ويجب أن يتراوح مجموع المساحة الكلية لمجارى العضو الدائر بين ٥٠٪ و ٧٠٪ من المساحة الكلية لمجارى العضو الثابت . ويكون معامل الملء (filling factor) في العضو الدائر (وهو عبارة عن نسبة مساحة النحاس في المجرى إلى مساحة المجرى نفسه) أكبر قليلاً من نظيره في العضو الثابت ، إذ يبلغ قيمته حوالى ٤٥ . ، مقابل من ٣٣ . إلى ٣٨ . في حالة العضو الثابت .

وتكون نسبة ارتفاع المجرى إلى خطوته وكذلك نسبة عرض المجرى إلى

خطوته أقل منها في العضو الثابت . وتحدد النسبة بين ارتفاع المجرى في العضو الدائر إلى نظيره في العضو الثابت بحوالى ٨٠٪ على هذا الأساس .

وعندما يكون العضو الدائر ذا قفص سنجابي (عادي أو مفرد) من النحاس، فإننا نحتاج الى حيز من المجارى يتسع لحوالى ٦٠٪ من المساحة الكلية لمقاطع الملفات النحاسية في العضو الثابت . وتزداد هذه النسبة إلى ٢٠٠٪ عندما يكون العضو الدائر ذا قفصين من مادتي النحاس والمسنج (ذات المقاومة العالية في القفص الخارجى) . أما إذا كان القفص السنجابي المفرد من مادة الالومنيوم وملفات العضو الثابت من النحاس فإن النسبة تصل إلى ١٠٠٪ .

يبين شكل (٥ - ٥) الأشكال التقليدية لمجارى العضو الدائر ذى القفص السنجابي من النوعين المفرد والمزدوج . ويؤدى استخدام المجرى ذى الشكل المستدير أحيانا إلى تقليل عرض السنة إلى درجة غير مقبولة، مما يجعل المجرى ذى الشكل البيضاوى مفضلا عليه . وتستخدم القضبان ذات الإرتفاع الكبير لزيادة عزم دوران البدء ، ويكون عرض السنة كافيا لإعطاء كثافة خطوط مغناطيسية فيها صغيرة في هذه الحالة ، بينما تزداد كثافة الخطوط المغناطيسية تحت المجرى إلى الحد الذى يفضل معه مجارى في وضع مائل بالنسبة لنصف القطر .

هذا ويجب تجنب استخدام المجارى التى يؤدى تشكيلها إلى جعل قيمة أضيق عرض للسنة أقل من ٦ ملميمتر ، أو بجعل كثافة الخطوط المغناطيسية تزيد عن ١٨٠٠٠ إلى ٢٠٠٠٠ جاوس عند هذا العرض .

(٧ - ٥) عدد الموصلات والضغط المستخدمة في العضو الدائر :

تنقسم الضغوط المستخدمة في العضو الدائر ذى الحلقات الإنزلاقية، على حسب نوع المواد العازلة المستعملة ، إلى منخفضة حتى ٨٠٠ فولت ، ومتوسطة بين ٨٠٠ و ١٣٠٠ فولت حتى ٢٢٠٠ فولت ، بين كل حلفتين في حالة السكون .

ولا يستحب استخدام ضغوط أعلى من ٢٢٠٠ . وإذا دعت الحاجة إلى ذلك، فإننا نتجنب ظهور هذه الضغوط العالية بتقليل قيمة الضغط الموصل إلى المحرك عند بدئه بما يتناسب مع الضغط المنشود . أو قد تستخدم توصيلة دلتا في ملفات العضو الدائر عند البدء ، ثم تحول إلى توصيلة نجمة بعد ذلك ، مما يؤدي إلى استخدام ست حلقات انزلاقية يكون الضغط بين كل اثنين منها هو الضغط المرحلي، وليس الضغط الخطي الكبير .

وبالنسبة للتيار المار في كل حلقة انزلاقية ، فإنه يستحب أن يكون على قدر الإمكان أقل من ألف أمبير . وأعلى قيمة يمكن السماح بها هي ١٥٠٠ أمبير ، ويمكن في بعض الحالات الخاصة أن تصل إلى ٢٠٠٠ أمبير . ويجب أن نتوقع أن تصادفنا في هذه الأحوال بعض الصعوبات ، التي تتعلق بالحلقات الانزلاقية والفرش الراكبة عليها .

ويحدد عدد الموصلات في العضو الدائري الحلقات الانزلاقية تبعاً لقيمة الضغط المرحلي في حالة السكون، الذي سبق تعيينه . ويتم ذلك باستخدام طريقة مشابهة لتلك التي اتبعت عند تحديد موصلات العضو الثابت ، مع ازدياد درجة المرونة في هذه الحالة ، نظراً لأن تغيير ضغط العضو الدائر في حدود ١٠٪ لا يستلزم عمل أية تعديلات في جهاز البدء . وبالنسبة للآلات الكبيرة فإن كل مجرى من مجاري العضو الدائر يستوعب غالباً موصلين .

ويسهل على هذا الأساس تحديد عدد الموصلات بصورة مبدئية لكل مرحلة من مراحل هذا العضو، وبالتالي الضغط المرحلي . ويمكن عمل التعديلات المناسبة في عدد الموصلات لللائمة ضغط معين عن طريق تقسيم مجموعات الملفات إلى اثنين أو ثلاثة ، وتوصيلها على التوازي ، حيث يهبط بناء على ذلك عدد الموصلات في المرحلة الواحدة إلى النصف أو الثلث .

(٨ - ٥) عدد المجارى والقضبان فى العضو الدائر ذى القفص السنجابى :

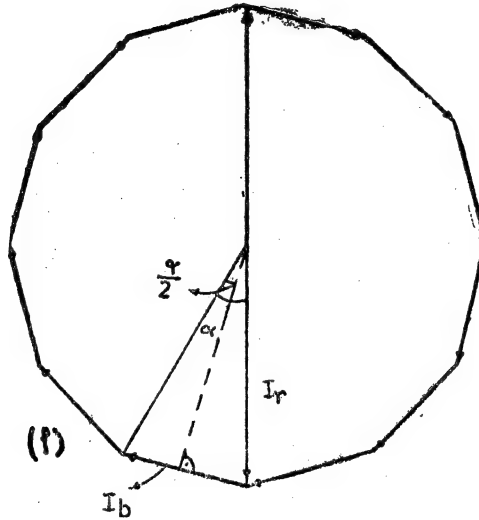
يتم تحديد عدد المجارى، فى حالة العضو الدائر ذى القفص السنجابى، بنفس الطريقة التى اتبعت فى حالة العضو الدائر ذى الحلقات الإنزلاقية . وباعتبار وجود قضيب من قضبان القفص السنجابى فى كل مجرى ، يكون عدد القضبان مساويا لعدد المجارى . ويمكن فى بعض الحالات وضع قضيب فى المجرى ورك الذى يليه فارغا ، بحيث يصبح عدد القضبان مساويا لنصف عدد المجارى فقط . وفى كلتا الحالتين راعى أن يكون عدد القضبان زوجيا ويقصر القضبان على كل من جانبيها حلقة طرفيه (end ring) ، حيث يتكون القفص السنجابى بالشكل الذى تم وصفه فى الباب الأول . وبالنسبة لحسابات القفص السنجابى لا تعتبر القضبان بهذا الشكل متصلة على التوازي عن طريق الحلقتين ، وإنما تعتبر فى حقيقة الأمر متصلة على التوالى . ويلشأ ذلك نتيجة لإعتبار التيار فى كل قضيب من هذه القضبان تيارا ثانويا . لذلك يتم حساب المقاومة الثانوية بجمع مقاومات القضبان جميعا ، مع مراعاة إضافة مقاومة جزء الحلقة الخاص بكل قضيب إلى مقاومة القضيب نفسه ، واعتبار المقاومة المرجلية ثلث هذه القيمة ، على أساس تصور أن كل ثلث من عدد القضبان خاص بمرحلة من المراحل الثلاث

(٩ - ٥) التيارات المارة فى القضبان ، فى كل حلقة من القفص السنجابى

تختلف شدة التيار المار فى القضيب I_r عن شدة التيار المار فى كل من الحلقتين I_r ، حيث يكون I_r أكبر I_b بصورة ملحوظة . وإذا كانت α هى الزاوية الكهربائية بين كل مجرىين متتاليين ، فإن العلاقة بين هذين التيارين تكون على النحو التالى :

$$I_b = 2 I_r \sin \frac{\alpha}{2} \quad (٥ - ٨)$$

ويتضح ذلك من مراجعة الشكل (٥-١) حيث تمثل الاوتار في الدائرة تيارات القضبان ويمثل نصف القطر تيار الحلقة الجانبية . فاذا اعتبرنا



(شكل ٥-١)

أن جيب الزاوية $\frac{\alpha}{2}$ يساوى قيمة الزاوية بالتقدير الدائري ، على أساس أن α زاوية صغيرة ، وأن S_2 هو عدد المجارى (أو عدد القضبان) في العضو الدائر ، نجد أن :

$$I_b \approx 2 I_r \times \frac{\alpha}{2} \approx I_r \frac{2p \times \pi}{S_2} \approx \frac{2p \times \pi}{3 \times 2p \times q_2} \times I_r$$

$$\approx \frac{\pi \times I_r}{3q_2} \approx \frac{1.05}{q_2} I_r$$

$$\text{or } I_r \approx I_b \times \frac{q_2}{1.05} \quad (٥-٩)$$

هذا ويمكن الحصول على التيار I_b على النحو التالي :

إذا افترضنا أن عدد مراحل العضو الثابت هو N_1 ومعامل اللف k_{w1} ،
وعدد الملفات المتصلة على التوالي في كل مرحلة هو T_1 ، فإننا نحصل على قيمة
التيار المرحلي I_2 في العضو الدائر الذي يحتوى على عدد من المراحل N_2 من
العلاقة :

$$I_2 = \frac{N_1 k_{w1} T_1}{N_2 k_{w2} T_2} I'_2 \quad (٥-١٠)$$

حيث I'_2 هي قيمة التيار المرحلي الذي يمر في مراحل العضو الثابت N_1 ،
ويكون من الناحية الكهربائية مكافئاً للتيار I_2 ، حين يمر في مراحل العضو
الدائر التي عددها N_2 .

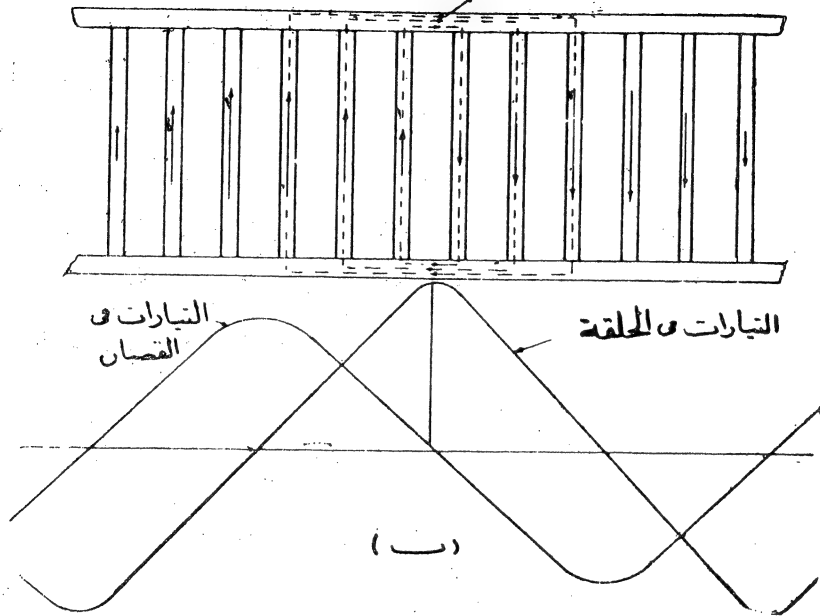
ويعتبر العضو الدائر مكوناً من ملفات متعددة المراحل تحتوى على عدد
من الموصلات أو القضبان مساوياً S_2 ، يتصل كل اثنين منها بينهما
خطوة قطبية معاً ، مكونين عدداً من المراحل مقداره $\frac{S_2}{2}$. وتتكون كل
مرحلة من لفة واحدة . ذلك لأن القضبان الواقعة تحت كل خطوة قطبية
للمجال المغناطيسي الدائر تتكون في كل منها قوة دافعة كهربية تتوقف قيمتها
على موقعها من هذا المجال المغناطيسي ، كما هو واضح في شكل (٢-٥) !

ولتسهيل الأمور أكثر من ذلك يمكننا أن نتصور أن كل قضيب يمثل
مرحلة واحدة تحتوى على نصف لفة ، وفي هذه الحالة يكون التيار I_2 هو
نفسه تيار القضيب I_b ، وعلى هذا الأساس نجد أن

$$I_b = \frac{N_1 k_{w1} T_1}{(S_2/p) \times 1 \times p/2} I'_2 = \frac{2 N_1 k_{w1} T_1}{S_2} I'_2 \quad \dots (٥-١١)$$

وذلك باعتبار أن عدد مراحل العضو الدائر في هذه الحالة هو عدد المجارى

قيمة النهاية العظمى للتيار للحلقة - مجموع التيارات الخطية و مصاب
نصف خطوة قطبية



شكل (٢ - ٥)

أو القضبان في خطوتين قطبيتين ، حيث يختلف التيار في كل قضيب عن الآخر على مدى هاتين الخطوتين ويتكرر على نفس النمط في كل خطوتين بعد ذلك ، واعتبار أن عدد القضبان الموصلة على التوازي في كل مرحلة هو p ، فيكون عدد اللفات في المرحلة $p/2$. فإذا كانت g ترمز لعدد المجاري لكل قطب و z_s ترمز لعدد الموصلات في كل مجرى ، وكانت $S_2 = 2 p g_2$ ، $T_1 = g_1 p z_{s1}$ ، فإن $k_{wT} = 0.955$ ، $N_1 = 3$ وبالتعويض في معادلة I_b السابقة نجد أن :

$$I_b = 0.955 \left(\frac{g_1 z_{s1}}{g_2} \right) I'_2 \quad (١٢ - ٥)$$

$$I'_2 = I_1 \cos \phi_1 \quad (٥ - ١٣)$$

حيث I_1 هي قيمة التيار المرحلي في الملفات الابتدائية، ϕ_1 زاوية الاختلاف المرحلي لهذا التيار .

يتبين لنا من شكل (٣ - ٥) ب أن قيمة النهاية العظمى لتيار الحلقة I_{rm} هو مجموع قيم التيارات اللحظية في نصف عدد القضبان على مدى خطوة قطبية واحدة . وهذا يعني أن I_{rm} يساوى متوسط مجموع النهايات العظمى للتيارات في هذه القضبان، أى أن:

$$I_{rm} = \frac{2}{\pi} \times \frac{1}{2} g_2 I_{bm}$$

$$I_r = \frac{g_2}{\pi} I_b = \frac{3q_2 I_b}{\pi} \approx I_b \times \frac{q_2}{1.05}$$

$$(٥ - ١٤)$$

حيث I_b هو تيار القضبان الفعال و I_r هو تيار الحلقة الفعال (جذر متوسط المربع) .

وهي نفس النتيجة التي حصلنا عليها سابقاً في المعادلة (٩ - ٥) . ويلاحظ أنه إذا فرضنا أن كثافة التيار في الحلقة تساوى كثافة التيار في القضبان، يتحدد قطر الحلقة بما يساوى تقريباً قطر القضيب، بأخذ المعادلة (١٤ - ٥) في الحسبان ، وذلك إذا كانت الحلقة مصنوعة من نفس معدن القضيب ، والا يجب أخذ اختلاف معامل التوصيل للمعدنين في الاعتبار .

(١٠-٥) حساب قيمة المقاومة المرحلية للمفات العضو الثابت وملفات العضو الدائر:

ينبغي في هذا المجال أولاً حساب طول القضيب

I_b ، ومتوسط طول الحلقة عند فردها ، في حالة القفص السنجابي . وبالنسبة لطول القضيب فإنه يتحدد على أساس طول المنتج I_a بزيادة تتراوح ما بين ٦٠ و ١٢٠ ملليمتر أى أن:

$$I_b = I_a + 60 \rightarrow 120 \text{ mm} \quad (٥ - ١٥)$$

وبالنسبة لمتوسط قطر الحلقة D_r ، الذى يتحدد على أساسه متوسط طول الحلقة المفرد $I_r = \pi D_r$ فإنه يكون أقل من القطر الخارجى للعضو الدائر بمقدار يساوى ما بين ارتفاع وضغط ارتفاع سنة العضو الدائر . إذا كانت R_b هى مقاومة قضيب واحد (مع أخذ موضعى اتصال القضيب ، بكل من الحلقتين الجانبيتين فى الاعتبار) ، وكانت R_r هى مقاومة حلقة واحدة ، فإن مفقودات التيار ($I^2 R$ losses) فى القفص السنجابي تكون عبارة عن

$$S_2 I_b^2 R_b + 2 I_r^2 R_r = (S_2 R_b + 2 \frac{g_2^2}{\pi^2} R_r) I_b^2 \quad (٥ - ١٦)$$

وهذه هى نفسها المفقودات فى ملفات العضو الدائر المكافئة (الملفات عبارة عن N_1 من القضبان) وتساوى ، $N_1 I_2'^2 R_2'$. ومن ثم يمكننا الحصول على المقاومة المرحلية للقفص السنجابي R_2' منسوبة إلى الملفات الابتدائية على النحو التالى:

$$N_1 I_2'^2 R_2' = (S_2 R_b + 2 \frac{g_2^2}{\pi^2} R_r) I_b^2$$

$$R_2' = \frac{S_2 (R_b + R_r \frac{2 g_2^2}{S_2 \pi^2}) I_b^2}{N_1 I_2'^2} \quad (٥ - ١٧)$$

بالتعويض عن I_b من المعادلة (٥ - ١١) وعن S_2 بما يساويها وهو $2 p g_2$ ، نجد أن:

$$\frac{2 R_r g_2^2}{\pi^2 S_2} = \frac{2}{2 \pi^2} \times \frac{R_r g_2}{p} = \frac{0.1 R_r g_2}{p} \quad (٥-١٨)$$

$$R_2' = \frac{4 N_1 k_{w1}^2 T_1^2}{S_2} (R_b + 0.1 R_r \frac{g_2}{p}) \quad (٥-١٩)$$

وفي حالة العضو الثابت العادي ثلاثي المراحل ، حيث $N_1 = 3$ ، نجد أن $k_{w1} = 0,955$

$$R_2' = 11 \frac{T_1^2}{S_2} (R_b + 0.1 R_r \frac{g_2}{p}) \quad (٥-٢٠)$$

يتضح لنا من المعادلة (٥-١٩) أن معامل التحويل من ملفات العضو الدائر إلى ملفات العضو الثابت ، لكي ننسب إلى هذا الأخير ، هي $\frac{4 N_1 k_{w1}^2 T_1^2}{S_2}$. لذلك نجد أن ممانعة التسرب للملفات العضو الدائر منسوبة إلى ملفات العضو الثابت X'_{20} بدلالة الممانعة الأصلية X_{20} :

$$X'_{20} = \frac{4 N_1 k_{w1}^2 T_1^2}{S_2} X_{20} \quad (٥-٢١)$$

بالنسبة للمقارمة المرحلية للملفات العضو الثابت، أو ملفات العضو الدائر ذي الحلقات الانزلاقية، فإنها تحسب من القانون $R = \frac{\rho l}{A}$. نحصل على الطول من ضرب عدد الموصلات في المرحلة الواحدة $\frac{z}{3}$ في الطول المتوسط لكل موصل l الذي تحدده من الرسم أو مبدئياً من العلاقات التجريبية الآتية:

أ - في حالة الملفات اليدوية (أى الملفوفة يدويا):

ملفات العضو الثابت ذات الطبقة الواحدة

$$l_c = l_a + 60 + 1.2 \tau_p$$

ملفات العضو الدائر ذات طبقتين وتربة بنسبة $\frac{5}{4}$

$$l_c = l_a + 34 + 0.67 \tau_p$$

ملفات العضو الثابت ذات الطبقة الواحدة فى الآلات الكبيرة

$$l_c = l_a + 100 + 1.6 \tau_p$$

ملفات العضو الثابت نصف المجهزة لضغط ٢٠٠٠ فوالت

$$l_c = l_a + 370 + 1.7 \tau_p$$

ملفات مجهزة ذات طبقتين

$$l_c = l_a + 2d + 2S + k + 50$$

(٥ - ٢٢)

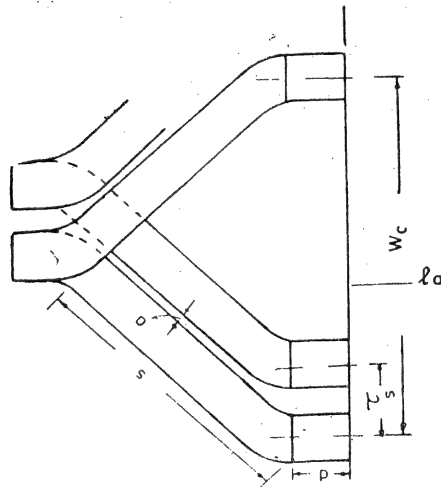
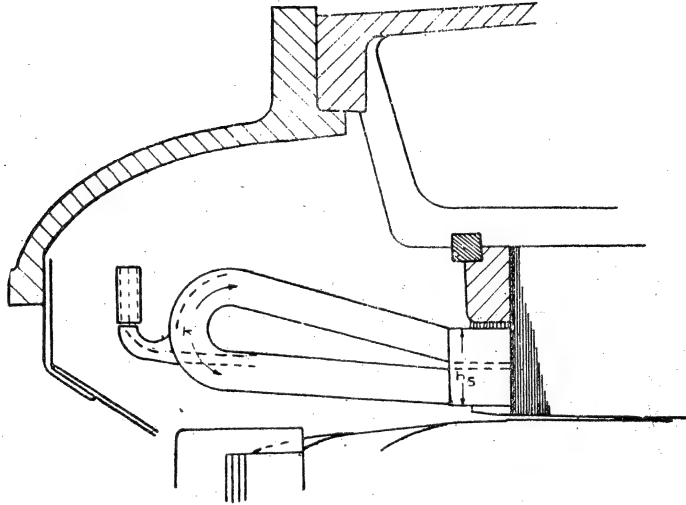
حيث l_a هو طول المنتج بما فى ذلك فتحات التهوية ، وكل الأبعاد بالمليمتر و d هو طول الجزء من الموصل خارج المجرى قبل ثنيه و S هو طول الجزء المنحنى من الموصل و k هو متوسط طول الجزء الدائرى (نصف دائرة) عند رأس الملف و τ_p الخطوة القطبية ، كما هو مبين فى شكل (٥-٣)

ب - فى حالة الملفات الهيكلية (Formed coils) يمكن الحصول على طول الموصل l_c من العلاقة :

$$l_c = l_a + 2d + 2S + k + 50 \text{ mm.} \quad (٥ - ٢٣)$$

ويمكن تعديل هذه العلاقة لحساب الطول l_c على النحو التالي :

$$l_c = 1 + 2d + W_c \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{b_s + a}{\tau_s}\right)^2}} + \frac{\pi}{4} h_s + 50 \text{ mm.} \quad (٥-٢٤)$$



شكل (٥-٣)

حيث W اتساع الملف ، h_s هو ارتفاع المجرى ، b_s هو عرض المجرى ، τ_s خطوة المجرى ، وباقي الأبعاد كما هو مبين في شكل (٣ - ٥) ، أو كما سبق.

ولحساب طول القضييب l_b في القفص السنجاني يمكن استخدام العلاقة:

$$l_b = l_a + 60 \rightarrow 120 \text{ mm.} \quad (٥ - ٢٤)$$

ويكون قطر الحلقة الجانبية المتوسط D_r في القفص السنجاني عبارة عن قطر العضو الدائر منقوصاً منه ارتفاع الى ضعف ارتفاع مجرى العضو الدائر.

(١١ - ٥) ممانعة التسرب المرحلية لكل من العضو الثابت والدائر:

(Stator and rotor leakage reactances)

توجد ثلاثة أنواع من الخطوط المغناطيسية المتسربة حول الملفات في كل من العضوين . هذه الأنواع الثلاثة هي:

أ) الخطوط المتسربة حول الموصلات عبر المجارى على مدى طول المنتج، وهي التي تكون الفيض المغناطيسي المتسرب حول المجاري (slot leakage) ϕ_s وعلى نحو ما فعلنا في آلات التيار المتردد (كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربائية) ، فالتنا نبدأ بحساب قيمة السماح المغناطيسي μ_s لمسار الفيض ϕ_s المتسرب حول المجرى ، على حسب أبعاده ، وذلك لكل سنتيمتر واحد من طول المنتج . ويتم حساب ممانعة التسرب على أساس قيمة μ_s . ويكون حساب قيمة μ_s باستخدام قانون الدائرة المغناطيسية ، كما فعلنا في آلات التيار

المستمر (كتاب هندسة الآلات الكهربائية). وسوف نكتفي هنا بذكر قيم λ_{s1} الخاصة ببعض الأشكال شائعة الاستعمال من المجارى في كل من العضوين الثابت والدائر، حيث نرمز بالرمز λ_{s1} للسماح المغناطيسي في مجارى العضو العضو الثابت و λ_{s2} لتظيره بالنسبة للعضو الدائر.

يبين شكل (٤ - ٥) بعض أنواع المجارى المستخدمة في العضو الثابت ، وفيما يلي قيم λ_{s1} الخاصة ببعضها.

$$\lambda_{s1} = c_1 \frac{h_1}{3a} + c_2 \frac{h_2}{a} \quad [\text{شكل (٤ - ٥) أ}]$$

$$\lambda_{s2} = c_1 \frac{s}{3a} + c_2 \frac{h_2}{a} + \frac{d}{4a} \quad [\text{شكل (٤ - ٥) ب}]$$

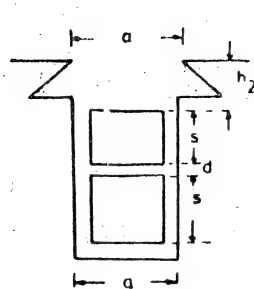
... (٥ - ٢٥)

c_1, c_2 ثابتان يتوقف كل منهما على نسبة اتساع الملف τ_c إلى اتساع الخطوة القطر τ_p ، كما في شكل (٦ - ٥). المعادلة (٥ - ٢٥) خاصة بالمجارى المفتوحة التي تحتوى على طبقة واحدة والتي تحتوى على طبقتين من الملفات ، وفيما يلي المعادلة المناظرة الخاصة بالمجارى نصف المقفلة .

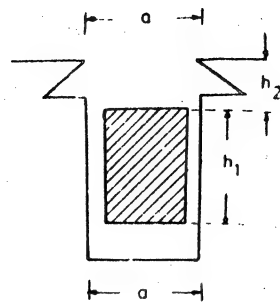
$$\lambda_{s1} = c_1 \frac{h_1}{3a} + c_2 \left(\frac{h_2}{a} + \frac{2h_3}{a+a_1} + \frac{h_4}{a_1} \right) \quad [\text{شكل (٤ - ٥) ج}]$$

$$\lambda_{s1} = c_1 \frac{s}{3a} + c_2 \left(\frac{h_2}{a} + \frac{2h_3}{a+a_1} + \frac{h_4}{a_1} \right) + \frac{d}{4a} \quad [\text{شكل (٤ - ٥) د}]$$

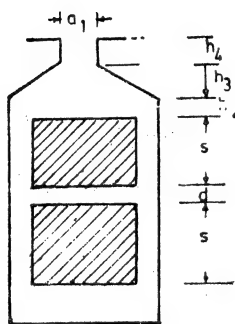
... (٥ - ٢٦)



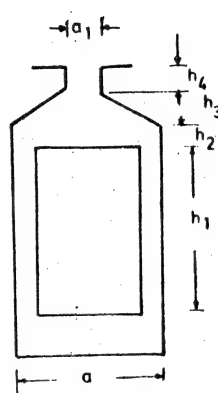
(ب)



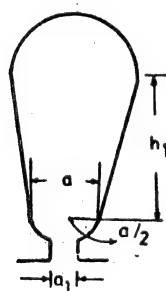
(ج)



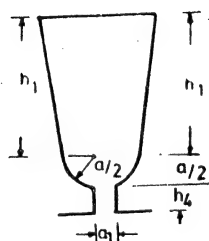
(د)



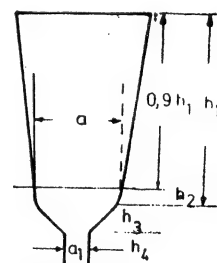
(ه)



(و)



(ز)



(ح)

(شکل ۴ - ۵)

توجد في المحركات الصغيرة أشكال للمجاري تختلف عن الأشكال التقليدية السابقة، وهي مبنية في الأشكال (٤ - ٥) هـ، و، ز والمعادلات الخاصة بها كما يأتي :

$$\lambda_{s1} = \left(\frac{h_1}{3a} + \frac{2h_2}{a+a_1} + \frac{h_4}{a_1} \right) \quad [\text{شكل (٤ - ٥) هـ}]$$

$$\lambda_{s1} = \left(0.65 + \frac{h_1}{3a} + \frac{h_4}{a_1} \right) \quad [\text{شكل (٤ - ٥) و، ز}]$$

(٥ - ٢٧)

هذا وعند استخدام ملفات يدوية من طبقتين في هذه المجارى، تعدل القيم التي نحصل عليها من المعادلة (٥ - ٢٧) بمعامل مقداره ٨٧ ر.، عندما تكون خطوة الملف τ_c إلى الخطوة القطبية τ_p تساوى $\frac{5}{7}$ ، وبمعامل مقداره ٨٤ ر. عندما تكون النسبة $\frac{7}{9}$ ، وبمعامل مقداره ٨٦ ر. عندما تكون النسبة $\frac{1}{4}$

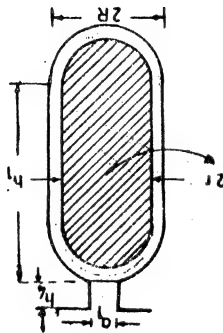
يبين شكل (٥ - ٥) بعض أنواع المجارى المستخدمة في العضو الدائر (الملفوف وذى القفص السنجابي الواحد وذى القفصين)، وفيما يلي قيم λ_{s2} الخاصة ببعضها.

$$\lambda_{s2} = c_c \frac{h_1}{3a} + \frac{h_4}{a_1} \quad \text{[شکل (۵-۵)]}$$

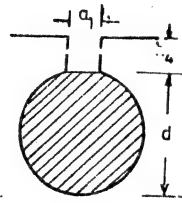
$$\lambda_{s2} = 0.6 + c_c \frac{h_1}{6R} + \frac{h_4}{a_1} \quad \text{[شکل (۵-۵) ب]}$$

$$\lambda_{s2} = 0.65 + \frac{b_4}{a_1} \quad \text{[شکل (۵-۵) ج]}$$

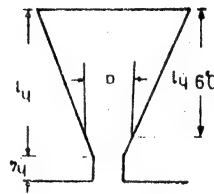
(۵-۵-۲۸)



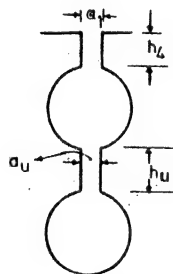
(ب)



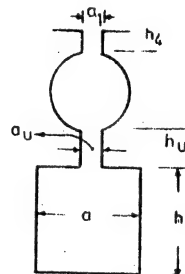
(ج)



(د)



(۵)



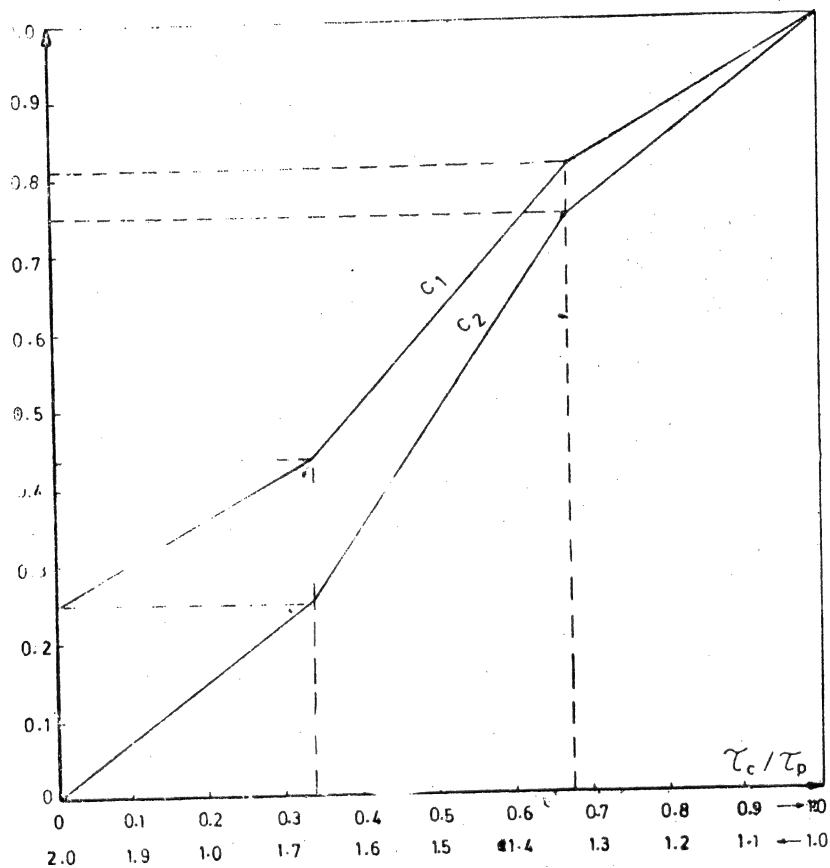
(۶)

شکل (۵-۵)

c_c معامل تتوقف قيمته على العمق المعدل h_i من عمق الموصل h_c بالعلاقة الآتية.

$$h_i = \sqrt{s \frac{f}{50} \frac{1}{50 \rho}} h_c \quad (٥-٢٩)$$

وتؤخذ قيمة c_c من المنحنى شكل (٥-٧)، مع ملاحظة أن s هو معامل الانزلاق، f تردد الينبوع، ρ هي المقاومة النوعية عند درجة حرارة التشغيل، وقيمتها حوالي $\frac{1}{50}$ أوم ملليمتر مربع لكل متر. بذلك تكون قيمة h_i تساوى h_c في حالة السكون ($s = 1$) وعندما يكون تردد الينبوع ٥ ذبذبة في الثانية.



شكل (٥-٦)

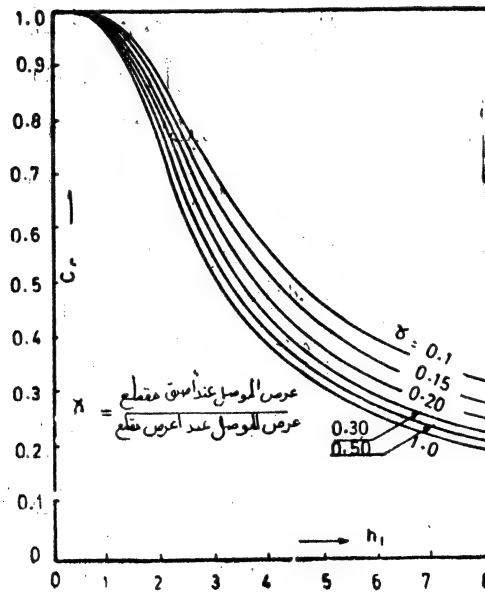
إذا رمزنا للجزء من ممانعة التسرب المرجحية الناشئة عن الفيض المتسرب حول مجارى العضو الثابت بالرمز X_{s1} ، ونظيره الخاص بمجارى العضو الدائر، منسوباً للمفات العضو الثابت ، بالرمز X_{s2} ، نجد أن:

$$X_{s1} = 3.975 \times \left(\frac{Z_1}{3}\right)^2 \times f_1 \times \frac{l_a}{p} \times \frac{\lambda_{s1}}{q_1} \text{ ohm...} \quad (٥ - ٣٠)$$

$$X_{s2} = 3.975 \left(\frac{Z_2}{3}\right)^2 \times f_1 \times \frac{l_a}{p} \times \frac{\lambda_{s2}}{q_2} \text{ ohm ...} \quad (٥ - ٣١)$$

$$X'_{s2} = 3.975 \left(\frac{Z_1}{3}\right)^2 \times f_1 \times \frac{l_a}{p} \times \frac{\lambda_{s2}}{q_2} \times \left(\frac{k_{w1}}{k_{w2}}\right)^2 \quad (٥ - ٣٢)$$

حيث Z_1 هو عدد الموصلات الكلى على العضو الثابت.



(شكل ٥ - ٧)

ونلاحظ أننا في حالة العضو الدائر ذى القفص السنجابي نعوض بالقيم $q_2 = \frac{S_2}{6p}$ ، $k_{w2} = 1$ ويكون طول المنتج l_a بالسنتيمترات و f_1 هو تردد الينبوع كالمعتاد.

(ب) الخطوط المتسربة حول رؤوس الملفات (التوصيلات الطرفية)
في العضوين الثابت والدائر ، وهي التي يتم على أساسها حساب جزء ممانعة التسرب الخاص بهذه الأجزاء من الملفات . ويكون تحديد هذه الخطوط وحصر مسارها من الصعوبة بمكان ، مما يجعلنا نلجأ إلى استخدام علاقة عملية مقربة في هذه الحالة تجمع ما بين العضوين معاً . فإذا رمزنا إلى جزء ممانعة التسرب الخاص برؤوس الملفات في العضوين معاً بالرمز X_h ، نجد أن :

$$X_h = 3.975 \times \left(\frac{Z_1}{3}\right)^2 \times f_1 \times \frac{l_{h1}}{p} \times \lambda_{h1} \times 10^{-8}$$

(٥-٣٣)

حيث l_{h1} هو الفرق بين متوسط طول الموصل l_c المعطى بالمعادلات (٥-٢٢) وطول المنتج l_a ، أى طول الجزء من الموصل الخاص بالتوصيلة الطرفية ، λ_{h1} هو السماح المغناطيسى لسلك وحدة طول من التوصيلات الطرفية ، مقدراً بالنسبة للعضوين معاً ، ويؤخذ من الجدول الآتى :

| ملفات العضو الثابت طبقتين | ملفات العضو الثابت طبقة واحدة | نوع ملفات العضو الدائر |
|------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| ٠.٣ - ٠.٤ | ٠.٥ | ملفوف ذو طبقة واحدة |
| ٠.٣ | ٠.٤ | ملفوف ذو طبقتين |
| ٠.١٥ - ٠.٢٥ | ٠.٣٥ | قفص سنجابي |

هذا وتزداد قيمة X_h كلما قل عدد أقطاب المحرك ، حتى أنها قد تشكل نصف قيمة ممانعة التسرب الكلية في المحركات ذات القطبين .

(ج) خطوط التسرب المتعرجة (zigzag leakage) ، وهي الخطوط المتسربة حول الموصلات في منطقة حديد المنتج ، ولكنها تأخذ مساراً متعرجاً في الحديد ما بين أسنان العضو الثابت وأسنان العضو الدائر مارة في الثغرة الهوائية عدة مرات . لذلك يمكن إهمال ممانعة التسرب الناشئة عن هذه الخطوط عندما يكون طول الثغرة الهوائية طويلاً نسبياً . والحقيقة أن حساب هذه الممانعة من أشق الأمور ، لأنها تتوقف على عوامل كثيرة من الصعب تحديدها . ويمكن حساب السباح المغناطيسي لكل وحدة طول على نحو مماثل للنوعين السابقين بالنسبة للعضو الثابت λ_{z1} ، وبالنسبة للعضو الدائر λ_{z2} كما يأتي .

$$\lambda_{z1} = \frac{(\tau_{s2} - a_{1r} - a_{1s})^2}{12 l_g \tau_{s2}}$$

$$\lambda_{z2} = \frac{(\tau_{s1} - a_{1s} - a_{1r})^2}{12 l_g \tau_{s1}}$$

(٥ - ٣٤)

حيث a_{1s} عرض فتحة المجرى في العضو الثابت و a_{1r} عرض فتحة المجرى في العضو الدائر .

ويكون حساب ممانعة التسرب الخاصة بخطوط التسرب المتعرجة في العضو الثابت X_{z1} ، وفي العضو الدائر (منسوبة الى ملفات العضو الثابت) X'_{z2} ، على نحو مماثل لما سبق كما يأتي .

$$X_{z1} = 3.975 \times \left(\frac{Z_1}{3}\right)^2 \times f_1 \times \frac{l_a}{P} \times \frac{\lambda_{z1}}{q_1} \times 10^{-8}$$

(٥ - ٣٥)

$$X_{z2} = 3.975 \times \left(\frac{Z_2}{3}\right)^2 \times f_1 \times \frac{I_a}{p} \times \frac{\lambda_{z2}}{q_2} \times 10^{-8}$$

(٥ - ٣٦)

$$X'_{z2} = 3.975 \times \left(\frac{Z_1}{3}\right)^2 \times f_1 \times \frac{I_a}{p} \times \frac{\lambda_{z2}}{q_2} \times \left(\frac{k_{w1}}{k_{w2}}\right)^2$$

(٥ - ٣٧)

تحتسب قيمة ممانعة التسرب المرحلية المكافئة X_{leq} منسوبة الى ملفات العضو الثابت وهي تساوى $(X_1 + X'_{20})$ باستخدام العلاقات المعطاة سابقاً في هذا البند ، حيث نجد أن.

$$\begin{aligned} X_{leq} &= X_1 + X'_{20} = X_s + X_h + X_z \\ &= (X_{s1} + X_{z1}) + (X'_{s2} + X'_{z2}) + X_h \end{aligned}$$

(٥ - ٣٨)

ولتجنب الوقوع في أخطاء حساسية، دون أن ندرى ، يمكننا مراجعة بعض القيم التي نحصل عليها، والتي تقع عادة في الحدود التالية.

λ_{s1} تقع ما بين ١ الى ٤

λ_{s2} تقع ما بين ٠.٨ الى ٤ في الأحوال العادية وقد تصل الى ١٠ عند وجود ممرات تسرب زائدة .

λ_h تقع ما بين ٠.١٥ الى ٠.٥

q_1, q_2 تقع ما بين ٢ الى ٥

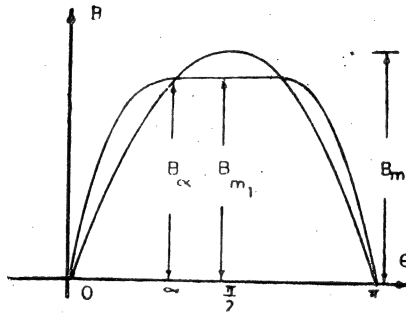
k_{w2}, k_{w1} تقع ما بين ٠.٩٦ الى ١ ($k_{w2} = 1$) في حالة القفص السنجاني).

$$\frac{I_{h1}}{I_a} \text{ تقع ما بين } ٣ \text{ الى } ١٥$$

(١٢ - ٥) حساب تيار المغطسة المرحلي الداخلى من الينبوع I_{ou} :

عند مرور تيارات مترنة ثلاثية المراحل (بينها اختلاف مرحلي زمنى يناظر ١٢٠ درجة) ، يتكون مجال مغناطيسى دائر ، يدور بسرعة التزامن n . (راجع رد فعل المنتج والمجال المغناطيسى الدائر صفحة ٩٨ كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية) . وقد ذكرنا فى الباب الأول أنه عند توصيل المحرك التأثيرى ثلاثى المراحل وهو غير محمل إلى الينبوع ، ينشأ مجال مغناطيسى دائر على هذا المنوال ، عدد خطوطه المغناطيسية ϕ_m خط لكل قطب . ويتوقف خواص تشغيل المحرك التأثيرى على وجود هذا المجال ، الذى نفترض عادة بقاء عدد خطوطه ϕ_m ثابتاً بفعل تيار المغطسة I_{ou} [شكل (٧ - ١) صفحة ٣٢] . والمسألة التى تواجهنا فى باب تصميم المحرك التأثيرى تتعلق بكيفية حساب قيمة I_{ou} ، بمعرفة ϕ_m وأبعاد المحرك التى تتوفر لدينا من حسابات التصميم . والحقيقة أن المسألة تصبح بهذا الشكل مسألة دائرة مغناطيسية ، يمكن حلها بنفس الطريقة التى اتبعت فى حالة كل من آلات التيار المستمر والآلات المتزامنة (راجع الدائرة المغناطيسية لآلة التيار المستمر والأمبير لفات اللازمة على كل قطب صفحة ٢٢٢ من كتاب هندسة الآلات الكهربية) . وإن خير ما تفعله فى هذا المجال هو إعطاء مثال محلول يبين كيفية تطبيق النظريات المعروفة على هذه المسألة بالذات . ولكن قبل أن تفعل ذلك نحب أن نبين موضوعاً خاصاً بالمحركات التأثيرية ، وهو يتناول العلاقة ما بين قيمة النهاية العظمى والقيمة المتوسطة لكثافة الخطوط المغناطيسية فى الثغرة الهوائية ، وهى تختلف عن العلاقة التى سبق الحصول عليها فى حالة آلات التيار المستمر والآلات المتزامنة ، وذلك بسبب ظاهرة التشبع ، التى ينبغى أخذها فى الحسبان فى حالة المحركات التأثيرية بوجه خاص .

نحن نفترض في معظم الأحوال ، كما فعلنا سابقاً ، أن منحنى كثافة الخطوط المغناطيسية في الثغرة الهوائية هو منحنى جيبي ، قيمة النهاية العظمى له هي B_m جاوس ، كما في شكل (٨ - ٥) . ولكننا نجد أن ظاهرة التشبع تؤدي إلى إعطاء قيمة أقل للنهاية العظمى لكثافة الخطوط المغناطيسية



شكل (٨ - ٥)

في الثغرة الهوائية ، فتصبح B_{m1} جاوس ، كما هو مبين في شكل (٨ - ٥) فإذا افترضنا أن B_{m1} هذه هي قيمة كثافة الخطوط على المنحنى الجيبي عند الزاوية ∞ ، كما هو موضح في شكل (٨ - ٥) ، نجد أن

$$B_{m1} = B_{\infty} = B_m \cos \infty \quad (٥ - ٣٩)$$

فإذا افترضنا أن ∞ تساوي ٣٠ درجة ، فإن هذا يعني أن

$$B_{m1} = 0.866 B_m = 0.866 \times \frac{\pi}{2} B_a = 1.36 F_a$$

(٥ - ٤٠)

أي أن النسبة بين قيمة النهاية العظمى لكثافة الخطوط المغناطيسية B_{m1} ، ومتوسط كثافة الخطوط المغناطيسية B_a ، في هذه الحالة ، هو ١٫٣٦ بدلا من $\frac{\pi}{2}$. وفي الواقع أن اعتبار أن الزاوية ∞

تساوى ٣٠ درجة هو عملية تقديرية بحثة ، وفي بعض الأحيان تقدر قيمة ∞ بحيث تكون النسبة السابقة ١٤ ، وستكون حساباتنا القادمة فعلا على هذا الأساس .

يكون تقدير قيمة الأمبير لفات لكل قطب AT_p اللازمة لتمرير ϕ_m من الخطوط المغناطيسية لكل قطب ، في الدائرة المغناطيسية للمحرك ، بنفس الطريقة التي اتبعناها في آلات التيار المستمر والآلات المتزامنة ، وذلك على أساس الأبعاد التي حصلنا عليها من حسابات التصميم . وترتبط قيمة هذه الأمبير لفات بقيمة تيار المغطسة بالعلاقة الخاصة برد فعل المنتج للملفات ثلاثية المراحل في الآلات المتزامنة (المعادلة (٢ - ٣) كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية) ، على النحو التالي :

$$AT_p = 1.35 \frac{T_{ph}}{p} I_{ou} k_w \quad (٥ - ٤١)$$

$$I_{ou} = \frac{p AT_p}{1.35} \times \frac{1}{T_{ph} k_w} \quad (٥ - ٤٢)$$

ونظراً لأننا اعتبرنا قيمة النهاية العظمى لكثافة الخطوط B_{m1} هي القيمة عند الزاوية ∞ على المنحنى ، كما سبق بيانه ، فإن قيمة الأمبير لفات التي نحصل عليها وبالتالي قيمة تيار المغطسة تكون كلها عند الزاوية ∞ على المنحنيات الجيبية المناظرة . وبالقياص على المعادلة (٤٢ - ٥) يعنى هذا أن :

$$(I_{ou})_{\infty} = \frac{p (AT_p)_{\infty}}{1.35} \times \frac{1}{T_{ph} k_w} = I_{ou} \cos \infty$$

$$\therefore I_{ou} = \frac{p (AT_p)_{\infty}}{1.35} \times \frac{1}{T_{ph} k_w \cos \infty} \quad (٥ - ٤٣)$$

وباعتبار أن النسبة بين متوسط كثافة الخطوط المغناطيسية وقيمة

النهاية العظمى لها هي $\frac{1}{1.4}$ تكون قيمة $\cos \infty$ بالرجوع الى المعادلة (٤٠ - ٥) :

$$\cos \infty = 1.4 \times \frac{2}{\pi} = 0.89$$

وبالتعويض في المعادلة ٤٣ - ٥ ينتج أن

$$I_{ou} = p \frac{(AT_p)_{\infty}}{1.35} \times \frac{1}{0.89 T_{ph} k_w} \quad (٤٤ - ٥)$$

مثال محلول :

Determine the length of the armature core of a 3-phase, delta connected, 16 horsepower, 8-pole induction motor, which has to be operated from 500 V, 50 Hz supply, at 85.8 % efficiency and 0.66 power factor. The armature diameter is 23.5 cms and has a total number of 72 slots, with 22 conductors per slot. Assume a mean value for the flux density in the air gap of 4130 Gauss and neglect stator impedance drop.

Draw a diagram for the stator winding connections under 4 poles, assuming single layer winding with two plane end connections. Indicate the start point for each phase and the number of coil groups in each phase.

$$I_{ph} = \frac{16 \times 746}{3 \times 500 \times 0.858 \times 0.66} = 14.06 \text{ Amps}$$

$$I_L = \sqrt{3} I_{ph} = 24.35 \text{ Amps ,}$$

$$n_s = \frac{60 \times 50}{4} = 750 \text{ r.p.m.}$$

$$Z = 72 \times 22 = 1584, T_{ph} = \frac{Z}{6} = 264$$

$$q = \frac{72}{3 \times 8} 3, \infty = \frac{360 \times 4}{72} = 20^\circ \text{ elect.}$$

$$AC = \frac{I_{ph} Z}{\pi D} = \frac{14.06 \times 1584}{\pi \times 23.5} = 301 \text{ amp. cond./cm.}$$

$$k_w = \frac{\sin \frac{q_\infty}{2}}{q \sin \frac{\infty}{2}} = \frac{\sin 30}{3 \sin 10} = \frac{0.5}{3 \times 0.1735} = 0.96$$

$$E = 4.44 \phi T_{ph} f k_w \times 10^{-8}$$

$$500 = 4.44 \phi \times 264 \times 50 \times 0.96 \times 10^{-8}$$

$$\phi = 0.989 \times 10^6 \text{ lines}, \tau_p = \frac{\pi \times 23.5}{8} = 9.23 \text{ cms}$$

$$\frac{KW}{n_s} = 0.183 \times B \times AC \times 10^{-11} \times \cos \phi \times \eta D^2$$

$$\frac{16 \times 0.746}{750} = 0.183 \times 4130 \times 301 \times 10^{-11}$$

$$\times 0.66 \times 0.858 \times (23.5)^2 \times 1$$

$$\therefore l = 26 \text{ cms.}$$

يتم حل الجزء الثاني بعد مراجعة الباب الأول عن ملفات المنتج في آلات التيار المتردد ، كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربائية [على نمط شكل (١٧-١) ب]

مثال محلول ٢ :

Determine the main dimensions for a 3-phase, 1208 horse-power, 3000V, 50 Hz, 1500 r.p.m., delta connected induction motor. The specific electric loading is about 561 amp.-cond./cm, the mean specific magnetic loading 5400 Gauss and ratio stator core length to pole pitch 0.91. Assume an efficiency of 0.95, a winding factor of 0.924, a power factor of 0.89 and neglect voltage drops in stator impedance.

Find the value of the no load current per phase in the motor, if it has an effective air gap length of 0.24 cm and the no load power factor is 0.1. Assume that the ampere turns per pole in the machine are equal to 1 times the ampere turns necessary to produce the flux in the air gap.

$$I_L = \frac{1208 \times 746}{\sqrt{3} \times 3000 \times 0.95 \times 0.89} = 205 \text{ Amps}$$

$$I_{ph} = \frac{205}{\sqrt{3}} = 118.4 \text{ Amps}, p = \frac{60 \times 50}{1500} = 2, 2p = 4$$

$$C_0 = 0.183 \times 5400 \times 561 \times 0.95 \times 0.89 \times 0.924 \times 10^{-11}$$

$$\frac{1208 \times 0.746}{1500} = C_0 D^2 l, \quad l = 0.91 \frac{\pi \times D}{4} = 0.715 D$$

باختصار الحسابات السابقة نحصل على النتائج الآتية:

$$D = 58 \text{ cms}, \quad l = 41.5 \text{ cms}, \quad \tau_p = 45.6 \text{ cms}$$

$$\phi_m = B_l \tau_p = 5400 \times 41.5 \times 45.6 = 10.2 \times 10^3 \text{ lines}$$

$$E = V = 4.44 f \phi_m T_{ph} k_w \times 10^{-8}$$

$$T_{ph} = \frac{3000}{4.44 \times 10.2 \times 10^6 \times 50 \times 0.924} = 144$$

نحصل على الأمبير لفات اللازمة لتمرير الفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية AT_g ، ومن ثم الأمبير لفات لكل قطب AT_p ، على النحو التالي :

$$AT_g = 0.8 B_g l_{gc} = 0.8 \times (1.36 \times 5400) \times 0.24 = 1410$$

وذلك باعتبار أن قيمة النهاية العظمى لكثافة الخطوط في الثغرة الهوائية ١٣٦ مرة متوسط كثافة الخطوط ، كما سبق شرحه .

$$AT_p = 1.5 \times 1410 = 2115$$

باستخدام العلاقة (٤٣ - ٥) ، ومراعاة أننا اعتبرنا أن $\cos \alpha = 0.866$ نجد أن :

$$I_{ou} = \frac{2 \times 2115}{1.35 \times 144 \times 0.924 \times 0.866} = 27.2 \text{ Amps}$$

وهذه هي القيمة المطلوبة لتيار المغنطة في المحرك

$$\cos \phi_0 = 0.1 \quad , \quad \sin \phi_0 = \sqrt{1 - 0.01} = 0.996$$

$$I_0 = \frac{I_{ou}}{\sin \phi_0} = \frac{27.2}{0.996} = 27.3 \text{ Amps}$$

وهذه هي القيمة المطلوبة لتيار اللاحمل في المحرك .

مثال محلولة (٣) .

Estimate the magnetising current for a 3-phase, 490 V, 60 Hz., 1200 r.p.m., delta connected induction motor, which has a magnetic circuit with the following particulars. core length 12.4 cms (excluding ducts). The stator has 54 parallel sided slots

each 1.05 cm wide and 3.4 cm deep. The rotor has 72 parallel sided slots each 0.5 cm wide and 3.1 cm deep. The stator bore diameter is 29 cms, the air gap length is 0.5 mm and Carter's coefficient is 1.25. The mean flux density in the air gap is 4700 Gauss and the iron factor is 0.9. Stator and rotor core depths are 4.8 cms each. Assume a magnetisation curve for the steel laminations of the motor as follows:

| | | | | | | | |
|-------------------|---|---|------|----|----|------|----|
| H (amp. turns/cm) | 0 | 2 | 5 | 12 | 20 | 40 | 60 |
| B (kilo Gauss) | 0 | 8 | 11.5 | 14 | 15 | 16.2 | 17 |

Neglect stator voltage drops.

$$p = \frac{60 \times 60}{1200} = 3, \quad 2p = 6, \quad \infty = \frac{360 \times 3}{54} = 20$$

$$q = \frac{54}{6 \times 3} = 3, \quad k_w = \frac{\sin 30}{3 \sin 10} = 0.96$$

$$E = V = 4.44 \phi_m T_{ph} f k_w \times 10^{-8}$$

$$\phi_m = B \tau_p l = 4700 \times 12.4 \times \frac{\pi \times 29}{6} = 8.86 \times 10^5 \text{ lines}$$

$$T_{ph} = \frac{490 \times 10^3}{4.44 \times 60 \times 8.86 \times 0.96} = 216$$

١- الأمبير لفات اللازمة لتعريض الفيض المغناطيسي ϕ_m في الثغرة الهوائية

$$AT_g = 0.3 B_g l_g k_g, \quad \tau_p = \frac{\pi \times 29}{6} = 15.16 \text{ cms}$$

$$B_g = 1.36 B = 1.36 \frac{8.86 \times 10^5}{12.4 \times 15.16} = 6400 \text{ Gauss}$$

$$AT_g = 0.8 \times 6400 \times 0.05 \times 1.25 = 3200 \text{ amp-turns}$$

٢ - الأمبير لفات اللازمة لتمرير الفيض المغناطيسي ϕ_m في ستة العضو
 الثابت AT_{st} : $\frac{1}{2} \tau_s$ هي خطوة المجري على بعد ثلث عمق المجري من اضيق
 مقطع للسنة و $\frac{1}{2} b_{st}$ هو عرض السنة عند هذا العمق .

$$\tau_s \frac{1}{2} = \frac{\pi (29 + \frac{2}{3} \times 3.4)}{54} = \frac{\pi \times 31.267}{54} = 1.82 \text{ cm}$$

$$b_{st} \frac{1}{2} = 1.82 - 1.05 = 0.77 \text{ cm}$$

$$B_{st} \frac{1}{2} = \frac{1.36 \times 8.86 \times 10^5}{0.77 \times 0.9 \times 12.4 \times 9} = 15570 \text{ Gauss}$$

(راجع كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربية صفحة ٢٩٨)

نحصل من منحنى التغطس المعطى على الأمبير لفات لكل سم $H_{st} \frac{1}{2}$
 المناظرة لكثافة الفيض المغناطيسي $B_{st} \frac{1}{2}$

$$H_{st} \frac{1}{2} \stackrel{s}{=} 26 \quad , \quad AT_{st} = 26 \times 3.4 = 88$$

٣ - الأمبير لفات اللازمة لتمرير الفيض المغناطيسي في قلب العضو
 الثابت AT_{stc} .

$$B_{stc} = \frac{8.86 \times 10^5}{2 \times 4.8 \times 12.4 \times 0.9} = 8260 \text{ amp-turns}$$

$$H_{stc} = 2.25 \quad \text{من المنحنى}$$

$$l_{stc} = \frac{\pi (29 + 6.8 + 4.8)}{6 \times 2} = 10.64 \text{ cms}$$

$$AT_{stc} = 2.25 \times 10.64 \stackrel{s}{=} 24$$

٤ - الأمبير لفات اللازمة لتمرير الفيض المغناطيسي ϕ_m في سنة العضو الدائر AT_n .

$$\tau_r \frac{1}{3} = \frac{\pi (28.9 \times \frac{4}{3} \times 3.1)}{72} = 1.08 \text{ cm}$$

$$b_n \frac{1}{3} = 1.08 - 0.5 = 0.58 \text{ cm}$$

$$B_n \frac{1}{3} = \frac{1.36 \times 8.86 \times 10^5}{12.4 \times 0.9 \times 9.58 \times 12} = 15520 \text{ Gauss}$$

$$H_n \frac{1}{3} = 25 \quad \text{مأخوذة من المنحنى}$$

$$AT_n = 25 \times 3.1 = 77.5 \approx 78$$

٥ - الأمبير لفات اللازمة لتمرير الفيض المغناطيسي ϕ_m في قلب العضو الدائر AT_{rc} :

$$B_{rc} = B_{stc} = 8260, \quad H_{rc} \approx 2.2$$

$$l_{rc} = \frac{\pi (29 - 6.2 - 4.8)}{6 \times 2} = 4.72 \text{ cms}$$

$$AT_{rc} = 11$$

ويكون مجموع الأمبير لفات اللازمة لكل قطب هو:

$$AT_p = 320 + 88 + 24 + 78 + 11 = 521$$

باستخدام العلاقة (٤٣ - ٥)، ومراعاة أننا اعتبرنا أن $\cos \infty = 0.836$ نجد أن:

$$I_{ou} = \frac{521 \times 3}{216 \times 0.96 \times 0.866 \times 1.35} = 6.46 \text{ Amps.}$$

(١٣ - ٥) استخدام الحاسب الإلكتروني في تصميم المحركات التأثيرية:

(Application of the digital computer in designing induction motors)

يتضح لنا مما سبق أن عملية تصميم المحرك التأثيرى بحكمها عدد كبير من العوامل المتغيرة ، المرتبطة بعلاقات معينة مع بعضها البعض ، وأن النتائج التي نحصل عليها في النهاية تتوقف على ضبط هذه العلاقات ، وتحديد تلك العوامل ، بأساليب مختلفة . وعندما يراد ترشيد (optimisation) أحد هذه العوامل ، مثل ثمن المواد الداخلة في صناعة المحرك ، أو إحدى خواص تشغيل المحرك بصورة معينة ، فإن حسابات التصميم بالطرق التقليدية تصبح شاقة ومعقدة ، ولم توضع بعض القيود ، التي تعتمد أحيانا على الاعتبارات المكتسبة من خلال الممارسة العملية ، وبدون فرض عدد محدود من المواصفات . وبالرغم من ذلك كله فإن الوصول إلى المحل المنشود يصبح مستحيلا في كثير من الأحيان .

سوف نتناول في هذا البند ، باختصار ، كيف تمت الإستعانة بالحاسب الإلكتروني (The digital computer) حديثا لتطويع عملية تصميم المحركات التأثيرية ، وترشيد بعض العوامل المؤثرة فيها بحيث تصبح أكثر دقة ويسرا . هذا وأحب أن ألفت الانتباه منذ البداية إلى أن الحاسب الإلكتروني لم يأت بجديد بالنسبة لقوانين التصميم التقليدية والعلاقات التي تحكمها ، كل ما هنا لك أنه هيا لنا الوسيلة السهلة السريعة لإنجاز الحسابات المعقدة ، التي كانت تعرض لنا في كثير من الأحيان في أثناء عملية التصميم ، والتي كان إنجازها يحتاج إلى وقت طويل ، وقد أصبح معه متعذرة في بعض الأحيان . كما أنه هيا لنا الإستفادة من القوانين والعلاقات المتطورة في علم الآلات الكهربية ، التي تظهر من حين لآخر في النشرات العلمية ، في عمليات تصميم المحركات التأثيرية (وغيرها من الآلات الكهربية) ، بعد امكان حل مسائلها الحاسوبية على الحاسب الإلكتروني بدون عناء .

مجل القول أن الحاسب الإلكتروني قد حطم لنا حاجز التعقيد الحسابي ،
(arithmetic barrier) الذي كان يحول بيننا وبين الاستفادة من كثير
من العلاقات والقوانين المتطورة في علم الآلات الكهربية ، وغيرها من العلوم
المساعدة في مجال التصميم .

وقد أصبح المجال الآن مناسباً لكي تبرز حقيقة هامة بالنسبة لعلم التصميم ،
لم نتعرض لها فيما سبق ، وهي أن مسائل التصميم تنقسم إلى فئتين رئيسيتين ،
الفئة الأولى تنضوي تحت لواء التصميم التحليلي (Design analysis) ، وهذا
هو الأسلوب الذي درجنا على استخدامه في جميع مسائل التصميم التي تعرضنا
لها في كل المجالات السابقة ، والفئة الثانية وهي الخاصة بما يسمى بالتصميم
الاصطناعي أو التركيبي (Design synthesis) ، وهو ما لم نتعرض له
حتى الآن .

والتصميم التحليلي ، كما يتضح لنا من الممارسة السابقة ، يؤدي إلى الحصول
على خواص تشغيل المحرك (أو الآلة عموماً) باستخدام مجموعة من المتغيرات ،
التي تحكمها علاقات خاصة ، مع الاستعانة بمجموعة من الثوابت المحددة . أما
التصميم الاصطناعي فهو فن الحصول على مجموعة معينة من الثوابت ، التي تجعل
خواص تشغيل المحرك ، في النهاية ، مطابقة لمواصفات خاصة موضوعة مبدئياً .
وتصادفنا في خلال انجاز كل من عمليتي التصميم التحليلي والتصميم الاصطناعي
مجموعة من العمليات الحسابية المعقدة ، التي يمكن أن يساعد الحاسب الإلكتروني
في حلها مساعدة إيجابية وفعالة .

وقد بدأت الاستعانة بالحاسب الإلكتروني أصلاً في التصميم التحليلي ،
حيث كانت مهمة الحاسب الإلكتروني تنحصر في تسهيل الحسابات ، وجعلها
أسرع وأدق . وبالنظر إلى أنواع الحاسبات الالكترونية الموجودة في ذلك الوقت
فقد كانت الاستعانة بها في عملية التصميم الاصطناعي ممكنة بموازرة المجهود

الإنسانى ، وذلك بأن يقوم المصمم بتقدير مبدئى للثوابت المطلوبة (على هدى خبرته العملية المكتسبة فى هذا المجال) ، ويستخدمها فى تغذية المدخل للحاسب الالىكترونى (Computer input) ، فيكون مخرج الحاسب الالىكترونى (Computer output) هو عبارة عن خواص التشغيل التحليلية (أى التى نحصل عليها من خلال عملية تصميم تحليلي) للمحرك . ويمكن للمصمم بعد فحص هذه النتائج تعديل الثوابت المقروضة مبدئيا ، على هدى خبرته العملية المكتسبة ، والحصول على ثوابت أكثر قربا من الثوابت المطلوبة ، لتغذية الحاسب الالىكترونى من جديد . ويتم تكرار هذه العملية حتى نحصل على خواص التشغيل المحددة مبدئيا .

وعلى هذا النحو أمكن استخدام البرنامج التحليلي (analysis program) فى الحاسب الالىكترونى للحصول على مخرج نهائى من الحاسب على هيئة تصميم اصطناعى . وفى الحقيقة ، أن البرامج التحليلية مازالت تستخدم حتى الآن على نطاق واسع فى حل مسائل تصميم الآلات الكهربية على الحاسب الالىكترونى ، وذلك لأنها سريعة وسهلة الإعداد ، ويمكنها أن تعطى عائدا وفيرا من المعلومات فى مقابل اتفاق صغير نسبيا .

حل مسائل التصميم الاصطناعى والترشيد فى المحركات التأثيرية على الحاسب الالىكترونى

عند القيام بحل مسائل التصميم الاصطناعى فى المحركات التأثيرية (والمحركات عموما) نهتم بصفة خاصة بالمتغيرات المستقلة (independent variables) التى تتعلق بالأبعاد ومواد التصنيع لكل من الدائرة الكهربية والدائرة المغناطيسية للمحرك ، وكذلك المتغيرات الخاصة بالمواد العازلة ومعدات التهوية . ويجب أن تفرق فى هذا المضمار بين المعطيات المتغيرة الخاصة بالمدخل ، وهى التى تشمل البنود والمفردات التى يحددها الزبون

(طاب المحرك) فى مواصفاته ، مثل الضغط الخطى ، وتردد الينبوع ، ومعامل القدرة ومعامل الجودة عند الحمل الكامل ، وغير ذلك من المتطلبات ، وبين معطيات المخرج المتغيرة ، وهى التى تشتمل على قطر التجويف (bore diameter) وطوله ، وعدد المجارى وأبعادها ، وغير ذلك من الأبعاد التى سوف تؤهل المحرك لإعطاء خواص التشغيل التى يرغب فيها الزبون .

فإذا راودنا التفكير ، عند هذا الحد ، فى محاولة الحصول على حلول منظومية (System solutions) للمسألة ، فسوف يقف حائلا بيننا وبين ذلك مشاكل اللاخطية (nonlinearities) وعدم الاستمرار (discontinuities) ، وكذلك الإعتبارات الإقتصادية المتضمنة . وهذا يؤكدمرة أخرى ضرورة تآزر المجهود الإنسانى الذى لا يمكن تجاهله بأية حال من الأحوال ، مع ترتيب أقصى استفادة ممكنة من الحاسب الالىكترونى ، للحصول على النتائج المرجوة .

هذا ، ويكون حل مسألة التصميم الاصطناعى أكثر سهولة بالنسبة للمحركات التأثيرية الصغيرة ، التى تستخدم فيها الإطارات القياسية (Standard frames) . فإذا ما أصبحت أبعاد العضو الثابت قياسية ، يقل عدد المتغيرات المستقلة إلى حد كبير ، ويبقى منها أساسا اثنان ، وهما طول القلب (Core length) وعدد اللفات فى كل مرحلة . بذلك تؤول المسألة إلى نوع من الاصطناع الجزئى (partial synthesis) ، الذى يمكن معالجته على نحو ما أطلق عليه اسم التحقيق المتطور (progressive realization) ، حيث يتم تعديل المتغيرات المستقلة بدرجات مرسومة ومحددة فى كل مرة يعاد فيها التصميم ، حتى ينتهى الأمر بالحصول على حل مرض . ويمكن استخدام نفس الطريقة لترشيد تصميم المحرك . وعلى سبيل المثال فان ترشيد ثمن المواد يمكن أن يتم عن طريق عمل مسح شامل لجميع التصميمات المحتملة ، واختيار المناسب منها ، على نفس المنوال .

برامج الحاسب الالكتروني (Computer programs)

لن نتعرض هنا لطرق عمل البرامج ولغتها ، فهذا موضوع خارج عن الكتاب ، ولكن قد يكون من اللازم أن نذكر في هذا المجال أن أداء عمليات التصميم على الحاسب الإلكتروني يحتاج إلى تقليل عدد المتغيرات التي تدخل في عمليات التصميم بالطرق التقليدية ، وذلك بتحويلها إلى متغيرات جديدة ذات عدد أقل ، وتربط بينها علاقات مناسبة . وتستخدم في الوقت الحاضر تحويلات كثيرة من هذا النوع . وإلى جانب ذلك يمكن أن نعدد البرامج الروتينية (program routines) المستخدمة على النحو التالي:

١ - البرنامج السلبي (passive program) : وهي مجموعة الروتينات (routines) التي تطلق البيانات للبرنامج أو التي تقوم بعملية التصميم التحليلي ، باستثناء الروتينات التي تدخل تحت لواء برنامج التشغيل .

٢ - برنامج التشغيل (performance program) : وهي الروتينات المتعلقة بحساب ثوابت الدائرة المكافئة ، ثم حساب خواص التشغيل بناء على ذلك

٣ - البرنامج العامل (active program) : وهو الذي ينظم عملية البحث عن الحلول .

٤ - برنامج الدوال (functions program) : ويشتمل على مجموعة من الدوال الخاصة ببعض الحسابات المتعلقة بالتصميم ، مثل حسابات الممانعة ، والحسابات الخاصة بمنحنيات التغطس (magnetic B-H relations) ، وما يصاحب ذلك من ظاهرة التشبع ، وكذلك حسابات فتحات المجاري وأبعاد الملفات .

٥ - برنامج المدخل والمخرج : (Input and output program) وهو الذى يسجل المفردات الداخلة ، ويراجع على صحتها ، ثم ينقل عملية التحكم إلى روتين توجيهى (steering routine) . وكلما أعيد التحكم كرة أخرى تسجل بيانات جديدة . هذا ويسجل آخر روتين الوضع بالنسبة لجميع ثوابت المخرج عند نهاية دورة كاملة . وينظم روتين مخرج جميع روتينيات المخرج الفرعية المحدودة ، ويطبع المعلومات الخاصة بالتصميم والتشغيل .

٦ - البرنامج المراقب (monitor program) وهو يشتمل على مجموعتين من الأوامر : (أ) طبع المعلومات الخاصة بطريقة حساب تصميم معين لبيان كيفية الحصول على هذا التصميم ، وذلك لتسهيل اجراء عمليات التحسين و (ب) اصطياذ الأخطاء .

ويأخذ مثل هذا البرنامج زمناً يقدر بحوالى ٨٠ ثانية على الحاسب الالكترونى ، ويتكلف مبلغاً مقداره حوالى ٤٠ جنيهاً لكل حالة ، ولكنه يعطى عدة احتمالات للتصميم فى هذه الحالة .

الباب السادس

وسائل التحريك الكهربى

(Electric Drives)

(١ - ٦) نبذة عن نشوء وتطور تكنولوجيا وسائل التحريك الكهربى :

عندما بدأ المحرك الكهربى (Electric motor) ، فى مطلع القرن العشرين ، بأخذ مكان الآلة البخارية (steam engine) ، وخطوط نقل الحركة الميكانيكية (Transmission) ، أخذ ذلك يتم عن طريق استخدام المحرك الكهربى بدلاً من الآلة البخارية ، أو خط نقل الحركة الميكانيكية ، بحيث يمكن الاحتفاظ بجميع مقومات الإدارة الميكانيكية كما هى بدون تغيير . وقد كانت الآلة البخارية الواحدة تقوم بإدارة عدد كبير من الآلات الميكانيكية فى المصنع الواحد ، باستخدام خطوط نقل ميكانيكية عديدة الفروع .

وقد تطور الأمر بعد ذلك إلى الاستغناء عن خطوط النقل الميكانيكية ، بين المحرك الرئيسى (Main Motor) والآلات الميكانيكية المتفرقة التى يديرها ، واستخدام محرك كهربى خاص بكل آلة على حدة ، يرتبط بها ارتباطاً مباشراً على عمود إدارتها (Direct coupling between machine and motor) هذا وقد تطور الأمر إلى أبعد من ذلك بالنسبة للآلات التى تحتاج إلى إدارة فى أجزائها المختلفة ، وليس على عمود إدارتها الرئيسى فقط . فبدلاً من استخدام محرك كهربى واحد يقوم بإدارة الأجزاء التى تحتاج إلى الحركة فى الآلة بأكملها ، عن طريق نقل الحركة إليهما من هذا المحرك بالوسائل الميكانيكية المناسبة ، يستخدم محرك مستقل وقائم بذاته لإدارة كل جزء يحتاج إلى الحركة فى الآلة الواحدة نفسها .

وبذلك نجد أننا انتقلنا من مرحلة التحريك الكهربى المستقل مفرد المرحلة (individual single-motor drive)، حيث يقوم محرك كهربى واحد بتحريك جميع الأجزاء التى تقوم بعمليات رئيسية أو ثانوية فى الآلة الواحدة ، إلى مرحلة التحريك الكهربى المتعدد المستقل (individual multi-motor drive). وفى هذه الحالة نجد محركاً كهربياً قائماً بذاته لإدارة كل جزء يحتاج إلى الحركة فى نفس الآلة . فإذا أخذنا المخرطة (lathe) فى الورشة مثلاً لشرح ما سبق ، نجد أن مصدر الحركة فى الورشة بأكملها كان فى بداية الأمر محركاً ميكانيكياً كبيراً ، تنقل منه الحركة بخطوط النقل الميكانيكية إلى الآلات المختلفة فى الورشة ، ومنها مخزطتنا التى تضرب بها المثل ، ثم حل المحرك الكهربى الكبير محل المحرك الميكانيكى ، مع الاحتفاظ بكل وسائل نقل الحركة الميكانيكية كما هى . وتطور الأمر بعد ذلك ، فأصبح لكل آلة فى الورشة محركاً قائماً بذاته ، حيث يقوم محرك خاص بالمخرطة بإدارتها ، وكذلك توفير الحركة اللازمة لأجزاءها المختلفة بوسائل النقل الميكانيكية (حركة القطعة المخرطة وإدارة مكبسى التبريد والزييت) . وأخيراً أصبحنا نجد عدة محركات كهربية خاصة بالمخرطة الواحدة ، كل محرك يقوم بإدارة جزء منها ، مع وجود التكامل المناسب فى الحركة بينها .

ويميل التطور إلى ناحية استخدام التحريك الكهربى المستقل المتعدد المراحل فى الصناعة ، وذلك لأنه يساعد على آلية العمليات الانتاجية (automation of production processes) . كما أن التحريك الكهربى ، فى حد ذاته ، أصبح لا يبارى ، نظراً لما يطرأ على وسائل التحكم فى المحرك الكهربى ، بالنسبة لسرعته وعزم دورانه وبدئه ، وإيقاف وعكس حركته ، من تطور سريع ومستمر ، بطرق مضمونة ومتقنة ، تكاد تصل إلى حد الكمال فيما جد من تطورات .

هذا وإن إمكانية استخدام الحاسبات الإلكترونية لعمل برامج ، تقوم

بتنفيذها عناصر تحكم مخصصة يمكن اضافتها الى دائرة التحكم في المحرك الكهربى ، سوف تساعد على وضع أسس التكامل الآلى بين خطوط الانتاج فى المصنع الواحد ، بل وبين المصانع المختلفة ، أو حتى المشروعات المتعددة .

وقد يثور الاعتراض بأن الاتجاه الى تقنين التحريك على هذا النحو ، واستخدام محركات كهربية صغيرة يكون معامل جودتها منخفضاً نسبياً ، بدلا من تركيز التحريك الرئيسى فى محرك كبير يكون معامل جودته عالياً وثمنه أرخص كثيراً من مجموعة المحركات البديلة ، بحكم القواعد الثابتة للتصميم ، قد يكون ذلك خطأ من الناحية الاقتصادية ، حيث يؤدى الى زيادة فى التكاليف . وهذا جريا على ما ألفناه بالنسبة لمحطات التوليد الكهربية ، حيث يؤدى تركيز توليد القدرة الكهربية بكميات هائلة ، ثم نقلها وتوزيعها عند أمان استخدامها ، الى خفض واضح فى تكاليف انتاجها .

ويبدو الإعتراض وجيها لأول وهلة ، ولكن اعتبارات كثيرة خاصة بموضوع التحريك الكهربى ، تثبت عكس ذلك على خط مستقيم . من هذه الاعتبارات ، على سبيل المثال وليس على سبيل الحصر ، أن كل آلة عاملة يراد ادارتها نستلزم شروطا مناسبة فى الآلة المحركة ، لكي يكون تشغيلها مئمرأ من الناحية الاقتصادية . ولا يمكن بطبيعة الحال توفير آلة واحدة محركة ، لعدد من الآلات العاملة ، يمكن أن تستوفى جميع الشروط اللازمة لتشغيل كل هذه الآلات تشغيلاً اقتصادياً ناجحاً . ومن الواضح أن سهولة المواءمة بين الآلة العاملة ومحركها الخاص بها ، لإعطاء أحسن تشغيل اقتصادى لها ، يمكن أن يؤدى الى بعض التعويض فى التكاليف الزائدة الناشئة عن انخفاض معاملات الجودة لمجموعة المحركات الصغيرة ، التى تستخدم كبديل لمحرك رئيسى كبير ذى معامل جودة مرتفع نسبيا . كما أن احتمال تشغيل المحركات الكهربية المستقلة ، كل على حدة ، فى حدود الحمل الكامل

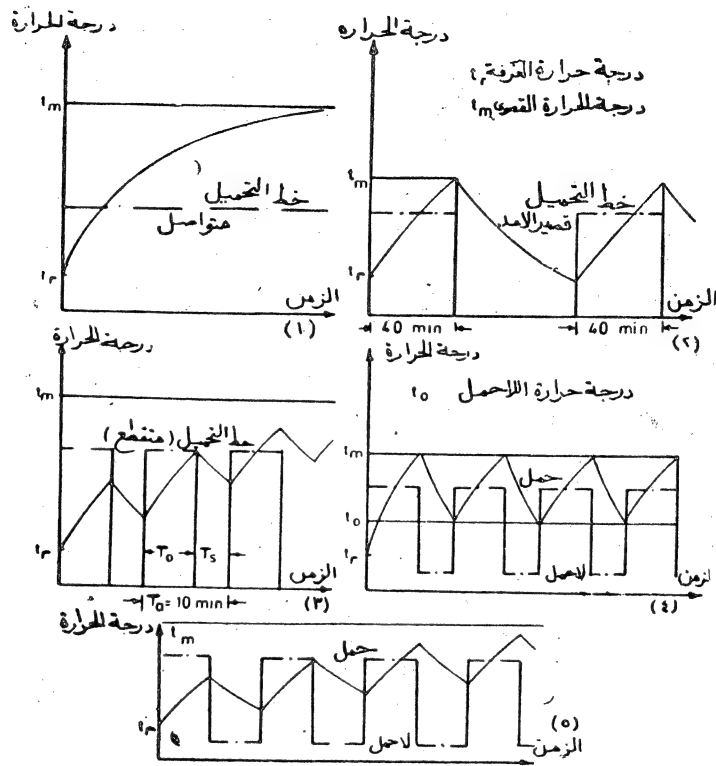
في أغلب الأحيان ، يفوق كثيراً احتمال تشغيل المحرك الكهربى الرئيسى الواحد بنفس الشروط ، مما يجعل المحركات المستقلة أكثر اقتصاداً عموماً في تكاليف التشغيل .

(٢ - ٦) الأنواع القياسية للتحويل الكهربى:

(Standard types of electric drives)

لم يوجد حتى الآن أى نوع من المحركات ينافس المحرك الكهربى في دقة ملائمة للمتطلبات الخاصة بحسن تنفيذ العمليات الصناعية المتباينة . فالمحرك الكهربى يمكن تصميمه وتنفيذه ، على أحسن وجه من الناحيتين الاقتصادية والتكنولوجية ، بقدرات تتراوح ما بين جزء صغير من الوات (المحركات التى تستخدم في لعب الأطفال ودوائر التنظيم الالكترونية) إلى عشرات الآلاف من الكيلووات (المحركات التى تستخدم في درفلة الحديد) ، كما أن سرعة الدوران يمكن أن تقع بين خمسين لفة وعشرين الف لفة في الدقيقة ، ويمكن ان تصل إلى خمسين الف لفة في الدقيقة مع امكانية دقة تنظيم هذه السرعات في حدود متفاوتة . هذا الى جانب سهولة عمليات بدء وإيقاف المحرك ، وعكس اتجاه دورانه ، بما قد يصل إلى حوالى سبعة آلاف مرة في الساعة.

وتكمن اهم العوامل التى تميز المحرك الكهربى ، على غيره من المحركات ، في إمكان تنفيذ تصميمه من البداية على اساس خطة زمنية مناسبة للآلة العاملة ، التى سوف يقوم بإدارتها . وتتوقف هذه الخطة على مقدار الوقت الذى تقوم فيه الآلة العاملة بالشغل المطلوب ، وكذلك مقدار الوقت الذى تكون فيه عاطلة عن العمل ، او تدور فيه بدون حمل . وعلى هذا الأساس فإن القواعد التى تختص بتقييم واختيار الآلات الكهربائية تشير الى تقسيم المحركات الكهربائية ، من حيث خطة التشغيل الزمنى لها ، الى ما يأتى (انظر شكل ١ - ٦) :



شكل (١-٦)

١ - التشغيل المتواصل (Continuous rating) : تحتاج الآلة العاملة ، لأداء وظيفتها في هذه الحالة ، إلى تشغيل المحرك بصورة مستمرة ، وبالحمل الكامل غالباً ، بحيث تصل درجة الحرارة ، في أجزائه المختلفة ، إلى قيمتها القصوى ، التي تم تنفيذ التصميم على أساسها ، ولا تتعداها مع استمرار التشغيل لأية فترة بعد ذلك . وتعمل مثل هذه المحركات مع المضخات التي يستمر عملها ليلاً ونهاراً ، وما أشبه من الأعمال .

٢ - التشغيل قصير الأمد (Short period rating) : تحتاج الآلة العاملة ، في هذه الحالة ، إلى فترات تشغيل متفرقة ، تمتد كل منها على فترة

زمنية محددة ، بحيث لا يؤدي تشغيل المحرك في خلال هذه الفترة الى تعدي درجة الحرارة القصوى في أى جزء من أجزائه . كما أن فترة الراحة ، التي تفصل بين كل فترتي تشغيل ، تكفي لكي يبرد المحرك ويأخذ درجة حرارة الجو المحيط به . ويطلق على حمل المحرك ، الذي يعطيه في خلال فترة التشغيل ، اسم الحمل الأمدى (period loading) ، وهو يقرن عادة بمدى فترة التشغيل ، فيقال مثلاً محرك (١٥ كيلووات — ٤٠ دقيقة) (10 KW — 40 min motor)

٣- التشغيل المتقطع (Intermittent rating) : يكون تشغيل المحرك في هذه الحالة لفترات قصيرة تتخللها فترات من الراحة يوقف فيها المحرك تماماً . ولكن فترات الراحة ، بخلاف الحالة السابقة ، لا تكفي لكي تنخفض درجة حرارة المحرك إلى حد درجة حرارة الجو المحيط به ، ولكنها تنخفض بعض الشيء . لكي تعاود الارتفاع في فترة التشغيل التالية الى درجة أعلى منها في فترة التشغيل السابقة ، وهكذا ، دون أن تتعدى الدرجة القصوى على أى حال . وتحدد فترة التشغيل T_0 (operation period) بالدقيقة مثلاً ، كما تحدد فترة الراحة أو السكون T_s (still stand period) بالدقيقة ، بحيث لا يتعدى أمد الدورة T_a (تشغيل وإيقاف $T_a = T_0 + T_s$ min) عشر دقائق بأية حال من الأحوال . ويطلق على النسبة بين زمن فترة التشغيل وأمد الدورة $\frac{T_0}{T_a}$ اسم فترة التوصيل النسبية (relative switching period) ، كما يطلق اسم الحمل المقتن أو الحمل الأمدى (rated load or period load) على الحمل الذي يمكن تشغيل المحرك به على النحو سالف الذكر ، لأية فترة مهما بلغت من الطول ، دون أن يتعدى المحرك درجة حرارته القصوى .

٤- التشغيل المتواصل بفترات تحميل قصيرة الأمد (Continuous rating with short period loading) يختلف هذا النوع من التشغيل ، عن التشغيل قصير الأمد ، من حيث أن المحرك بعد فترة تحميل قصيرة الأمد ،

يترك دأراً بدون حمل، مدة كافية ، بحيث تهبط درجة حرارته الى الحد الذي تقف عنده في حالة دورانه بصنعة مستمرة بدون حمل .

٥ - التشغيل المتواصل بفترات تحميل متقطعة (Continuous rating with intermittent loading) يختلف هذا النوع من التشغيل ، عن التشغيل المتقطع ، من حيث ان المحرك يمر بفترات متعاقبة ، من التشغيل بالحمل الكامل ، والدوران بدون حمل بدلا من السكون . وتكون فترة التوصيل النسبية ، في هذه الحالة ، هي النسبة بين زمن التشغيل بدون حمل ، وامتد الدورة الذي يجمع بين زمني فترتي التشغيل بالحمل وبدون حمل .

هذا ويجب على المحرك الكهربائي أن يفي بغرضين رئيسيين ، هما :
نوع تشغيله ، على النحو السابق ، وهما :

١ - ألا تتعدى درجة حرارته ، في أثناء التشغيل ، بأية حال من الأحوال ، درجة الحرارة القصوى ، تبعاً للحدود القياسية (Standard limits) التي تم تنفيذ تصميمه على اساسها .

٢ - يجب ان يكون المحرك الكهربائي قادراً على اعطاء الآلة العاملة عزم الدوران الذي تحتاج اليه عند سرعة الدوران المطلوبة .

وتجدر بنا الاشارة ، في هذا المضمار ، الى ان المحرك الكهربائي يستطيع ان يعطى عزم دوران يصل الى قيمة عزم دوران التعثر (Kipp - moment) ، التي تقضى القواعد القياسية المنظمة لطرق تنفيذ تصميم المحركات الكهربائية بأن تبلغ ١٢٦ من قيمة عزم دوران الحمل الكامل بالنسبة للمحركات ذات التشغيل المتقطع .

لهذا السبب نجد ان المحرك الكهربائي يمكن في خلال تشغيله تشغيلاً متواصلاً ان يتعدى درجة الحرارة القصوى التي تم تنفيذ تصميمه على اساسها ، دون ان يتعدى عزم دورانه ، عزم دوران التعثر ، وذلك عند تجاوز الحمل الكامل ، الذي يتميز

به . وهذا يعنى ان الفيصل فى وضع حدود التشغيل يكون عادة درجة الحرارة القصوى ، التى لا يجب ان يتعداها المحرك ، قبل الزيادة المحتملة فى قيمة عزم الدوران ، الذى يمكن ان تحتاج اليه الآلة العاملة .

هذا وعندما يكون تصميم المحرك الكهربى على اساس التشغيل المتواصل بقدرة معينة ، ولنفرض انها س كيلوات مثلاً ، فان هذا المحرك يبلغ درجة حرارته القصوى ، ويظل محتفظاً بها ، مهما طال وقت تشغيله . فاذا حدث وتم تشغيل هذا المحرك بنفس قيمة الحمل س كيلوات ، تشغيلاً قصيراً الأمد ، او تشغيلاً متقطعاً مثلاً ، فمن الواضح انه لن يبلغ درجة حرارته القصوى ويظل محتفظاً بها ، مهما طال وقت تشغيله . فاذا حدث وتم تشغيل هذا المحرك ، بنفس قيمة الحمل س كيلوات تشغيلاً قصيراً الأمد ، أو تشغيلاً متقطعاً مثلاً ، فمن الواضح أنه لن يبلغ درجة حرارته القصوى على المدى الطويل ، وذلك بسبب فترات الراحة التى تنخفض درجة حرارته فى خلالها . وهذا يعنى أننا نستطيع تشغيله على أى من النحويين بزيادة عن الحمل الكامل . وفى هذه الحالة يجب أن نراعى ألا يتعدى عزم الدوران الذى يؤخذ من المحرك عزم دوران التعثر ، أى أن الفيصل فى وضع حد لزيادة الحمل التى يمكن أن تتجاوز بها الحمل الكامل ، فى هذه الحالة ، هو عزم دوران التعثر للمحرك ، وليست درجة الحرارة القصوى كما كان الأمر فى الحالة السابقة .

(٣ - ٦) التوازن الديناميكي بين المحرك الكهربى والآلة العاملة :

(Dynamic Balance between driving electric-motor and working machine)

يعطى المحرك الكهربى ، على حسب الظروف الكائنة فى دائرته الكهربائية المتصلة مع اليزبوع الكهربى ، عزم دوران معين ، عند سرعة الدوران التى تفرضها الآلة العاملة على عمود الادارة المشترك بين المحرك والآلة ، تبعاً لمقدار الحمل على الآلة . بذلك تتحدد نقطة التشغيل على المنحنى الخصائى للمحرك

(characteristic curve)، الذى يربط عزم دوران المحرك مع السرعة . ويحدث توازن ديناميكى بين عزم الدوران الذى يبذله المحرك ، على هذا الأساس على عمود الإدارة المشترك ، مع رد فعل الآلة العاملة ، الذى يتكون فى هذه الحالة من محصلة ثلاث مركبات لعزم الدوران المضاد ، وهى : ١ - عزم دوران التعجيل أو التقصير (accelerating or retarding torque) الناشئ عن عزم القصور الذاتى للكتل الدائرة (moment of inertia of rotating masses)، وذلك عندما تكون سرعة الدوران متغيرة ، وتتلاشى هذه المركبة لعزم الدوران المضاد المحصل عندما يدور المحرك بسرعة ثابتة.

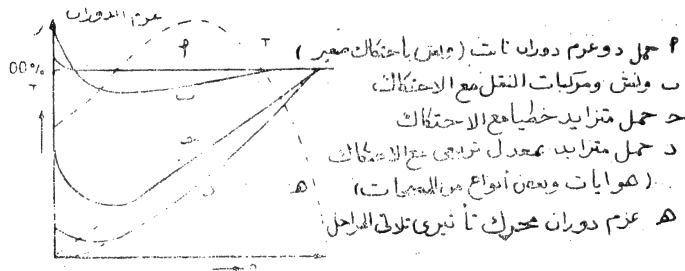
٢ - عزم الدوران النافع (useful torque) وهو الذى يستفاد به لآداء الشغل المطلوب من الآلة العاملة.

٣ - عزم دوران المفقودات الميكانيكية (Mechanical loss torque) وهو الذى يتغلب على مقاومة الهواء لحركة الدوران، والاحتكاك الناشئ فى الكراسى وغيرها من الأجزاء المختلفة فى المحرك والآلة العاملة .

وعندما يتغير الحمل على الآلة العاملة ، بالزيادة أو النقصان ، يختل التوازن الديناميكى بين عزم الدوران المحرك وعزم الدوران المضاد ، مما يؤدي إما إلى ارتفاع سرعة الدوران ، نتيجة لوجود عزم دوران تعجيل (accelerating torque) ، إذا قل الحمل وتغلب عزم الدوران المحرك ، وإما إلى انخفاض فى سرعة الدوران ، نتيجة لوجود عزم دوران تقصير ، إذا زاد الحمل وتغلب عزم الدوران المضاد . فإذا كان المحرك عاملاً على الجزء المتزن من منحنى خصائصه (stable part of the torque - speed Characteristic) الذى يربط بين السرعة وعزم الدوران ، فإن تغيير السرعة سوف يؤدي إلى تحرك نقطة التشغيل إلى الموقع الذى يحدث فيه التوازن الديناميكى مرة أخرى بين عزم الدوران المضاد الجديد ، الذى حدده الحمل ،

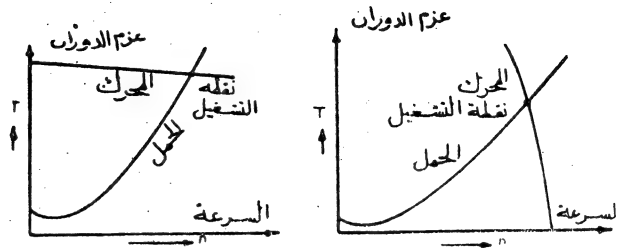
وعزم الدوران المحرك الذي تحددت قيمته عند نقطة التشغيل الجديدة . وإذا كان المراد تغيير الحمل مع ثبوت سرعة الدوران ، فلا بد من استخدام الوسائل المتاحة في دائرة المحرك لإعادة سرعة الدوران الى قيمتها الأولى .

هذا ويتوقف قيمة عزم الدوران المحرك على نوع المحرك وكيفية توصيله الى اليزبوع ، على حسب ما تمت دراسته بالنسبة للمحركات الكهربائية ، في حين تتوقف قيمة عزم الدوران المضاد ، التي يمكن أن تعتمد على سرعة الدوران ، على طبيعة العمل الذي تؤديه الآلة العاملة عموما . فبينما تحتاج آلات الرفع (lifting machines) الى عزم دوران ثابت تقريبا (مع اهمال الاحتكاك) عند جميع الأحمال ، نجد أن الهوايات (ventilators) تحتاج الى عزم دوران تتناسب قيمته مع السرعة . ويدين شكل (٢ - ٦) أمثلة للمنحنيات الخاصة بتغيير عزم الدوران لبعض الأحمال مع السرعة .



(شكل ٢ - ٦)

وللحصول على العلاقات الخاصة بالتحريك بين المحرك والآلات العاملة يلزمنا عادة الحصول على المنحنى الذي يربط بين قيمة عزم الدوران والسرعة لكل من المحرك والآلة العاملة، حيث يمكن تحديد نقطة التشغيل ، مع الظروف المعطاة ، من تقاطع هذين المنحنيين كما في شكل (٣ - ٦) . ويمكن أن يتم هذا كله أيضا بالطرق الحسابية .



شكل (٣-٦)

المتطلبات الخاصة بكل من المحرك والآلة العاملة للحصول على تحريك

مناسب : تشمل وسيلة التحريك الكهربى (Electric Drive) عادة على محرك كهربى (Electric motors) مناسب ، وأداة لنقل الحركة (transmission) الى الآلة العاملة (operating machine) ، ثم مجموعة من أجهزة التحكم (control system) التى تساعد على تكييف تشغيل الآلة العاملة على النحو المطلوب ، وذلك بالتحكم فى المحرك . ويمكن أن يقوم المحرك الكهربى الواحد بإدارة الآلة العاملة الخاصة به فيقال ان التحريك منفصل (individual drive) ، بينما يطلق اسم التحريك الجماعى (group drive) على المحركات التى تقوم بإدارة مجموعة من الآلات العاملة المختلفة . ويتعين على وسيلة التحريك أن تعطى أعلى قيمة للمخرج ، مع دقة تشغيل الآلة العاملة ، لى تؤدي مهمتها على الوجه الأكمل ، كما يجب أن تكون وسيلة التحريك مضمونة الخدمات (reliable in service) سهلة الصيانة (easy maintainance) ، رخيصة بالنسبة لتكاليف تشغيلها وإقامتها (cheap operational and installation costs limited details)

وتنحصر المواصفات الضرورية لتمييز وسيلة التحريك الكهربى فيما يأتى .

مقن قدرتها بالكيلووات أو الحصان (KW or Horse power rating) السرعة الأساسية (base speed) ، العلاقة التي تربط بين عزم دوران المحرك سرعته والمدى الذي يمكن أن يتم تنظيم السرعة في خلاله ، مقن الضغط وطبيعته على حسب ما إذا كان متردداً أو مستمراً ، طريقة البدء للمحرك الكهربى ، وكيفية حمايته ، ثم طريقة ربط المحرك الكهربى بالآلة العاملة لنقل الحركة اليها .

وتجدر الإشارة هنا إلى أن استخدام وسيلة التحريك الكهربى بقدرة أقل من مقن قدرتها بدرجة ملحوظة يسيء إلى معامل الجودة ، وكذلك معامل القدرة للمحرك ، كما أن تشغيلها بقدرة أعلى من مقن قدرتها ، على فرض احتمالها ذلك فى حينه ، يؤدى إلى تقصير عمرها واستهلاكها بمعدل أعلى كثيراً من المعدل الطبيعى .

هذا ويجب أن يراعى اختيار المحرك الكهربى ، المستخدم فى وسيلة التحريك ، بحيث تتلائم خصائصه الميكانيكية (mechanical characteristics) ، وهى التى تتحدد على أساس منحنى عزم دورانه مع سرعته ، مع متطلبات الآلة العاملة لأداء حملها الميكانيكى على الوجه المطلوب . وهذا يستدعى دراية تامة بطرق تشغيل المحركات الكهربائية ، والتحكم فى سرعتها ، وهو ما ماسنعرض له بصورة عامة فى فصل لاحق .

(٤ - ٦) أنواع وسائل التحريك الكهربى:

نستطيع أن نقسم وسائل التحريك الكهربى الى نوعين رئيسيين ، وهما الوسائل ثابتة السرعة (constant speed drives) ، والوسائل متغيرة السرعة (variable speed drives) . وبالنسبة للنوع الأول يمكننا استخدام أى نوع

من المحركات الكهربائية التي يمكن ان تحتفظ بسرعتها ثابتة مع جميع الأحمال مثل المحركات المتزامنة (synchronous motors) ، او تلك التي تتغير سرعتها تغييراً طفيفاً مع ازدياد الحمل ، ومنها جميع انواع المحركات التي تمتلك خاصية التوازي (shant characteristic) مثل محركات التيار المستمر توصيل توازي ، او المحركات التأثيرية ثلاثية المراحل ، او محركات التيار المتردد ذات المبدلات توصيل توازي . وقد يكون من المناسب في هذه الحالة تزويد المحرك بوسيلة لاسترجاع السرعة الى قيمتها الثابتة . اما بالنسبة للنوع الثاني من وسائل التحريك التي يتطلب ان تكون السرعة فيها متغيرة ، فان الغالب هو استخدام النوع الملائم من المحركات مع اجهزة التحكم المناسبة ، للحصول على السرعات المطلوبة .

وعند اختيار المحرك الكهربائي الملائم لوسيلة التحريك المطلوبة يجب مراعاة الظروف التي سوف تحيط به اثناء العمل جيداً ، فيؤخذ في الاعتبار درجة حرارة الجو ودرجة رطوبته ، وكمية الغبار العالقة به ، وما يمكن ان يتسرب اليه من اجخرة او مواد قابلة للاشتعال . وعلى هذا الأساس يمكن تحديد نوع المحرك من حيث كونه مفتوحاً (open) ، او مقفلاً ذات تهوية ذاتية (enclosed self ventilated) ، او مقفلاً ذات تهوية منفصلة (enclosed separately ventilated) او ضد الانفجار (explosion proof) الى غير ذلك من انواع المحركات للاغراض المتعددة . كذلك قد تتسبب طريقة الربط بين المحرك والآلة العاملة (coupling) في وضع مواصفات خاصة للمحرك الكهربائي بالنسبة لعمود الادارة فيه .

(٥ - ٦) ديناميكا التحريك الكهربائي (Dynamics of an electric drive)

يبدل المحرك الكهربائي الطاقة اللازمة لتأدية التحريك المطلوب ، سواء كانت حركة الحمل على الآلة العاملة خطية (linear motion) ، او دورانية (rotary motion) . ونظراً لأننا سوف نكون في حاجة الى تتبع الأفعال

$$F = F_1 + m \frac{dv}{dt} + F_f \quad (١ - ٦)$$

حيث $m \frac{dv}{dt}$ هي القوة النيوتينية (Newton's Force) أو قوة القصور الذاتي التي تعاكس بها كتلة الجسم الحركة، على حسب قانون نيوتن. وعندما تكون الحركة منتظمة السرعة ثابتة القيمة، فإن $\frac{dv}{dt}$ تساوى صفراً، ولا يوجد تأثير القصور الذاتي للجسم. كما أن F_f يمكن إهمالها في بعض الأحيان.

٢ - قواعد التحريك الدوراني: إذا أصبحت الحركة دائرية باستخدام طارة، كما هو مبين في شكل (٤ - ٦)، فإن T_1 يكون عبارة عن عزم الدوران المعاكس بالكيلوجرام . متر الذي يسببه وزن الجسم، حيث نجد أن العلاقة بين T_1 ، F_1 هي

$$T_1 = F_1 \times r \text{ K.g.m} \quad (٢ - ٦)$$

حيث r بالمتر هو نصف قطر الطارة التي تحول الحركة الخطية إلى دورانية.

فإذا كانت T هي عبارة عن عزم الدوران الذي تبذله وسيلة التحريك عند الطارة بالكيلوجرام . متر و T_f هو عزم الدوران المقاوم الناشئ بفعل الاحتكاك (يمكن إهماله في بعض الأحيان) و J تمثل عزم القصور الذاتي الناشئ عن فعل الكتلة m (أو الوزن W) وهي زاوية نصف قطرية/ثانية.

$$\omega = 2\pi \frac{n}{60} \quad \text{حيث } n \text{ سرعة دوران الطارة باللفة في الدقيقة و } \omega$$

$$\omega = \frac{v}{r} \text{ radians/sec} \quad \text{سرعة الدوران الزاوية المناظرة للسرعة الخطية } v$$

تصبح معادلة الحركة الدورانية عبارة عن:

$$T = T_1 + J \frac{d\omega}{dt} + T_f \quad (٦-٣)$$

باستخدام عزم الخدافة $\frac{G D^2}{4g}$ (fly - Wheel moment) بدلا من J في المعادلة (٦-٣) [راجع صفحة ٢٦٥ من كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربائية للمؤلف] و $\omega = 2\pi \frac{n}{60}$ نجد أن:

$$T = T_1 + \frac{GD^2}{4g} \frac{d\omega}{dt} + T_f = T_1 + \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} + T_f \quad (٦-٤)$$

هذا ويمكن لوسيلة التحريك الكهربى، فيما يتعلق بالمعادلة (٦-٤)، أن تتواجد في إحدى الحالات الآتية:

أ- $T > T_1 + T_f$ ، وهذا يعنى أن $\frac{d\omega}{dt} > 0$ ، أى أن وسيلة التحريك في حالة تعجيل، وسرعتها في إزدیاد، لكى تدرك سرعة التشغيل، عادة.

ب- $T < T_1 + T_f$ ، وهذا يعنى أن $\frac{d\omega}{dt} < 0$ ، أى أن وسيلة التحريك في حالة تقصير، وسرعتها في انخفاض تمهيداً لإيقافها، عادة.

ج- $T = T_1 + T_f$ ، وهذا يعنى أن $\frac{d\omega}{dt} = 0$ ، أى أن وسيلة التحريك أصبحت تعمل بسرعة ثابتة أو في حالة سكون، إذا لم تكن قد بدأت العمل بعد.

اجت (٦ من ٦) القواعد الخاصة بفضاء عناصر الحركة في وسيلة التحريك إلى كلها إلى

الأنظمة الإدارية المحرك الكهربائي: $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3 \dots$ الخ ، نجد أن عزم الدوران T_m ، اللازم بذله على عمود إدارة المحرك ، للحصول على عزم دوران الحمل T_l عبارة عن

عندما تعدد عناصر الحركة وأشكالها في وسيلة التحريك الواحدة ، ويكون مصدرها كلها محرك كهربائي واحد ، باستخدام وسائل نقل الحركة الميكانيكية ، يصبح من اللازم معرفة تأثير عناصر التحريك المختلفة على عمود إدارة هذا المحرك ، لكي يمكن معرفة عزم الدوران المطلوب منه بذله ، مع سرعة الدوران المناسبة ، وهي أهم المواصفات اللازم توفرها لتمييز المحرك . ويكون سريان القدرة (power flow) P من جزء إلى آخر في وسيلة التحريك ، مع اعتبار معامل جودة الأداة η ، التي تنقلها بين الجزئين ، هي دليلنا الأساسي في الحساب . وبذلك إذا ما اختلفت السرعة أو شكل الحركة من جزء إلى الجزء التالي.

$$\times \frac{n_{n-1}}{n_n} \times \frac{n_n}{n_m} = \frac{n_m}{n_1} \quad (٧-٦)$$

وفي هذه الحالة نستخدم العلاقة المعروفة $P = T\omega$ ، التي تربط بين القدرة وكاف الدوران والسرعة الزاوية في شكل مقبوضها فإذا تم تكن البطارية تحقق لكل (قوة الحمل) على كابل المثال ، كدور على العمود إدارة المحرك نفسه ، التحويل من سرعة الدوران إلى سرعة الدوران الكلي من عمود إدارة المحرك يحتاج إلى جهاز أو P_1 جهاز ميكانيكي ومنه إلى صندوق تروس عادة Gear Box) ، فإنا نستطيع أن ننسب حركة البطارية إلى عمود إدارة المحرك على النحو التالي : نفرض أن عزم دوران الحمل T_l كيلوجرام . متر على محور البطارية التي تدور بسرعة n لفة في الدقيقة يؤدي الحامل ويعبر عنه الأداة التي قيمته T_l كيلوجرام . متر على الدوامة إلى حركة المحرك الحدية ، ويكون بالسرعة n_m لفة في الدقيقة ، وبذلك عند نقل الحركة من محور البطارية إلى عمود إدارة المحرك باستخدام صندوق تروس

$$P = \eta_c \quad P_m = 9.81 \eta_c \quad T_m \times 2\pi \frac{n_m}{60}$$

لولا وجود مفقودات في صندوق التروس لما تغيرت قيمة القدرة التي تسرى من عمود إدارة المحرك الى الطارة ، ولاستطعنا أن نقرر أن $P = T_1 \omega = T_m \omega_m$ ، ولكن نظراً لوجود الفقد في القدرة في صندوق التروس نجد أن :

القدرة التي يعطيها المحرك على عمود الإدارة هي بالوات:

$$P_m = 9.81 T_m \times 2\pi \frac{n_m}{60}$$

القدرة التي تنتقل عبر صندوق التروس الى الطارة هي :

$$P_1 = \eta_g P_m$$

وحيث أن P_1 بالوات أيضاً عبارة عن:

$$P_1 = 9.81 T_1 \times 2\pi \frac{n}{60}$$

$$\therefore 9.81 \eta_g T_m \times 2\pi \frac{n_m}{60} = 9.81 T_1 \times 2\pi \frac{n}{60}$$

$$\therefore T_m = \frac{T_1}{\eta_g} \times \frac{n}{n_m} = \frac{T_1}{\eta_g \epsilon} \left[\epsilon = \frac{n_m}{n} \right]$$

(٦-٥)

ϵ هي عبارة عن نسبة سرعة دوران عمود إدارة المحرك الى سرعة الدوران على عمود الادارة التالى بعد نقل الحركة باستخدام الإداة ذات معامل الجودة η_g . فإذا تم نقل الحركة بهذه الطريقة مرات متتالية باستخدام ادوات نقل الحركة ، ابتداء من المحرك وفي اتجاه الحمل ، ذات معاملات الجودة $\eta_1 , \eta_2 , \dots , \eta_3$ الخ على التوالي ، وكانت نسب سرعات الدوران

ابتداء من عمود ادارة المحرك الى عمود الادارة الذى يليه ، ثم منه إلى عمود الادارة التالى ، وهكذا هى ϵ_1 ، ϵ_2 ، ϵ_3 ... الخ ، نجد ان عزم الدوران T_m ، اللازم بذله على عمود ادارة المحرك ، للحصول على عزم دوران الحمل T_1 عبارة عن

$$T_m = \frac{T_1}{\eta_1 \eta_2 \eta_3 \dots \times \epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_3 \dots} = \frac{T_1}{\eta_t \times \epsilon_t} \quad (٦-٦)$$

حيث η_t هى معامل الجودة الكلى للنقل الميكانيكى وهو عبارة

$$\eta_t = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \dots$$

كما كان :

$$\epsilon_t = \frac{n_m}{n_1} \times \frac{n_1}{n_2} \times \frac{n_2}{n_3} \times \dots \times \frac{n_{n-1}}{n_n} \times \frac{n_n}{n} = \frac{n_m}{n} \quad (٦-٧)$$

واذا كان الحمل يؤدي بحركة خطية بسرعة مقدارها v متر / الثانية تحت تأثير قوة الحمل F_1 كيلو جرام (كما هى الحال عند رفع الوزن W ، التى سبق الإشارة إليها فى شكل ٤-٦) فان القدرة التى يحتاج إليها الحمل P_1 لرفعه تكون فى هذه الحالة :

$$P_1 = 9.81 F_1 \times v \quad (٦-٨) \text{ وات}$$

فاذا كانت η_c هى معامل جودة الأداة التى تتحول فيها حركة المحرك الدورانية الى حركة خطية ، وكانت P_m هى قدرة المحرك كما سبق ، نجد ان

$$P = \eta_c P_m = 9.81 \eta_c T_m \times 2\pi \frac{n_m}{60}$$

$$\therefore T_m = 9.53 \frac{F_1 v}{\eta_c n_m} \text{ Kg.m.} \quad (٦-٩)$$

ومنها يمكن تحديد قدرة المخرج اللازمة للمحرك P_m بالعلاقة التقليدية بين القدرة وعزم الدوران .

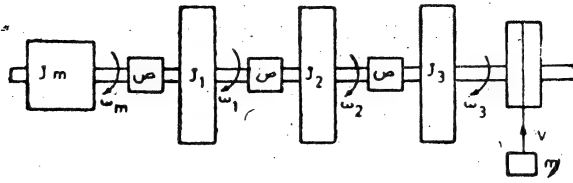
$$P_m = 9.81 T_m \omega_m = \frac{T_m n_m}{0.975} \quad \text{وات}$$

$$= \frac{T_m n_m}{975} \quad \text{كيلووات} \quad (٦-١٠)$$

وتجدر الإشارة هنا الى ان المعادلات من (٦-٥) الى (٦-١٠) تربط ما بين عزم الدوران النافع (useful torque) T_1 او القوة النافعة (useful force) F_1 التي يستفاد بها في الحمل وعزم دوران أو قدرة المحرك المطلوبة ، فإذا أردنا أخذ مفقودات الاحتكاك التي تصاحب حركة الحمل في الحسبان تضاف T_f إلى T_1 أو F_f إلى F_1 في هذه المعادلات ، وذلك عندما يكون التحريك منتظما ، أى أن السرعة ثابتة بدون تعجيل أو تقصير . فإذا لم تكن السرعة منتظمة ، فسوف يظهر حد ثالث مع T_1 أو F_1 حيث نجد أننا نستخدم في الحقيقة T كما تعطىها المعادلة (٦-٣) و F كما تعطىها المعادلة (٦-١) بدلا من $T_1 + T_f$ أو $F_1 + F_f$. وفي هذه الحالة سوف نحتاج إلى نسبة عزم القصور الذاتي J او عزم الخدافة $G \frac{D^2}{4}$ إلى عمود إدارة المحرك ، حيث ننسب عناصر الحركة في وسيلة التحريك إلى هذا العمود . ويتم ذلك عن طريق استخدام العلاقة الخاصة بطاقة الحركة $J \frac{\omega^2}{2}$ بالنسبة للكتل الدائرة و $\frac{m v^2}{2}$ بالنسبة للكتل المتحركة على النحو الآتى :

نفرض ، كما هو مبين في شكل (٦-٥) ، ان الآلة العاملة ترفع ثقلا وزنه

W (كتله m) بسرعة v متر / الثانية وان التحريك ينقل اليها من المحرك



شكل (٥ - ٦)

الكهربى على مرحلتين أو أكثر ، باستخدام أداتين ميكانيكيتين M_1 و M_2 أو أكثر ، بحيث يكون عزم القصور الذاتى للكتل التى على محور المحرك J_m ، والسرعة الزاوية ω_m ، وتتغير السرعة إلى ω_1 على المحور التالى ، ويكون عزم القصور الذاتى للكتل التى عليه J_1 ، ثم تتغير السرعة إلى ω_3 على المحور الواصل الى الآلة العاملة ، ويكون عزم القصور الذاتى للكتل التى عليه J_3 .

من الواضح ان المحرك الكهربى هو مصدر طاقة الحركة الكامنة فى جميع الأجزاء المتحركة فى وسيلة التحريك ، فإذا فرضنا عزم قصور ذاتى مكافئ J_d على عمود إدارة المحرك ، للحصول على طاقة حركة $\frac{\omega_m^2}{2}$ J_d بعزم القصور الذاتى هذا ، يغطى كل احتياجات طاقة الحركة فى الأجزاء المختلفة من وسيلة التحريك ، نجد ان :

$$J_d \frac{\omega_m^2}{2} = J_m \frac{\omega_m^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + J_2 \frac{\omega_2^2}{2} + \frac{1}{2} m v^2$$

بقسمة هذه المعادلة على $\frac{\omega_m^2}{2}$

$$= J_m + \frac{J_1}{\sigma_1^2} + \frac{J_2}{\sigma_2^2} + m \left(\frac{v}{\omega_m} \right)^2 \quad (٦ - ١٢)$$

$$\sigma_1 = \frac{\omega_m}{\omega_1} , \sigma_2 = \frac{\omega_m}{\omega_2} \quad \text{حيث}$$

يعطى المصنع ، من بين معلومات التصميم المصاحبة للآلة ، عزم الحدافة GD^2 بالكيلوجرام متر^٢ ، بدلا من عزم القصور الذاتي للكتل التي تدور على محور إدارة المحرك الكهربائي، وقد سبق ذكر ذلك في كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربائية (صفحة ٢٦٥) للمؤلف . ونحصل على عزم الحدافه في الواقع باعتبار أن طاقة الحركة الكامنة في الكتل الدائرة على عمود الادارة للمحرك $J_m \frac{\omega_m^2}{2}$ كيلوجرام متر^٢ تنشأ بفعل وزن اعتبارى مكافئ. مركز في نقطة قيمته G كيلو جرام ، يدور على محيط دائرة قطرها D متر بنفس السرعة الزاوية ω_m زاوية نصف قطرية في الثانية ، حول محور عمود إدارة المحرك . وبمساواة طاقتي الحركة الكامنة الاعتبارية والحقيقية ، نحصل على العلاقة بين عزم القصور الذاتي J_m وعزم الحدافه GD^2 في المحرك على النحو التالي .

الطاقة الكامنة E_n كيلو جرام متر في الكتل الدائرة على عمود إدارة المحرك باستخدام كل من عزم القصور الذاتي J_m الوزن الاعتبارى G هي

$$E_n = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \frac{G}{g} \left(\frac{\pi D n_m}{60} \right)^2 = \frac{1}{2} J_m \left(\frac{2 \pi n_m}{60} \right)^2$$

(٦-١٣)

$$\therefore J_m = \frac{GD^2}{4g} , \quad GD^2 = 4g J_m \quad (٦-١٤)$$

نستطيع الآن أن نستخدم عزم الحدافة المناظر بدلا من عزم القصور الذاتي على كل محور دوران في الحالة السابقة ، حيث نجد أن عزوم الحدافة المناظرة

لعزوم القصور الذاتي على المحاور المختلفة عبارة عن :

$$J_d = \frac{(GD^2)_d}{4g} , \quad J_m = \frac{(GD^2)_m}{4g}$$

$$, \quad J_1 = \frac{(GD^2)_1}{4g} , \quad J_2 = \frac{(GD^2)_2}{4g}$$

(٦-١٥)

أما بالنسبة للوزن W فإننا نحصل على $(GD^2)_1$ المكافئة منسوبة إلى عمود إدارة المحرك مباشرة ، وذلك باعتبار عزم القصور الذاتي المناظر J_1 ، مع سرعة الدوران الزاوية ω_m على عمود إدارة المحرك ، والمساواة بين طاقتي الحركة الكامنة في الوزن المتحرك ، وباستخدام عزم الحداثة المنسوب إلى محور إدارة المحرك ، على النحو التالي:

$$\frac{J_1 \omega_m^2}{2} = \frac{m v^2}{2}$$

$$\therefore \frac{(GD^2)_1}{4g} \cdot \frac{\omega_m^2}{2} = \frac{W}{g} \cdot \frac{v^2}{2}$$

$$\therefore (GD^2)_1 = 4 \times \left(\frac{60}{2\pi}\right)^2 \frac{W v^2}{n_m^2} = 365 \frac{W v^2}{n_m^2}$$

(٦-١٦)

بالتعويض من المعادلتين (٦-١٥) و (٦-١٦) في المعادلة (٦-١١) نجد أن :

$$(GD^2)_d = \left[(GD^2)_m + 365 \frac{W v^2}{n_m^2} \right] + \frac{(GD^2)_1}{\sigma_1^2} + \frac{(GD^2)_2}{\sigma_2^2}$$

(٦-١٧)

نضرب مثلاً لطريقة حساب طاقة الحركة الكامنة في محرك كهربائي قدرته ٥٠ كيلووات ويدور بسرعة ١٠٠٠ دورة في الدقيقة علينا أن نعلم الحدافة GD^2 (كل هو موجود في مواصفات المحرك المعطاة في نشرة المصنع) يساوي GD^2 بالكيلوجرام متر^٢، بدلاً من عزم القصور الذاتي للكتل التي تدور على محور إدارة المحرك الكهربائي، وقد سبق ذكر ذلك في كتاب نظريات وتصميم آلات الطاقة الكهربائية (صفحة ٢٦٥) للمؤلف. ونحصل على عزم الحدافة في الواقع باعتبار أن طاقة الحركة الكامنة في الكتل الدائرة على عمود الإدارة

$$\text{للمحرك} \quad \left(\frac{\omega_m}{\pi} - \frac{n_m}{60} \right) J_m \frac{\pi^2 n_m^2}{7200 g} \text{ تنشأ} \quad \left(\frac{\pi D n_m}{60} \right)^2 \text{ اختباري مكافئ}$$

مركر في نقطة قيمته G كيلو جرام ، يدور على محيط دائرة قطرها D متر بنفس السرعة الزاوية ω_m زاوية $(1000)^\circ$ قطرية في الثانية ، حول محور عمود إدارة المحرك . وبمساواة $9.81 \times 1400 = 13750$ والحقائق ، نحصل على $Watt$ 13750 الذي 9.81 1400 GD^2

في المحرك على النحو التالي:
(٦-٦) تعيين عزم الحدافة :

الطاقة الكامنة E_n كيلو جرام متر في الكتل الدائرة على عمود إدارة المحرك قد يكون من المناسب ، في هذه المرحلة ، إعطاء فكرة مبدئية عن كيفية المحرك باستخدام كل من عزم القصور الذاتي J_m الوزن الاعتباري G هي كيفية تحديد قيمة GD^2 لمحرك معين . بين شكل (٦-٦) طريقة مبسطة لذلك .

$$E_n = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} G \left(\frac{\pi D n_m}{60} \right)^2 = \frac{1}{2} J_m \left(\frac{2 \pi n_m}{60} \right)^2 \quad (٦-١٣)$$

الرسم

$$\therefore J_m = \frac{4}{3} G r^2 \quad \therefore \frac{4}{3} G r^2 \cdot \frac{1}{2} \omega^2 = \frac{1}{2} G \left(\frac{\pi D n_m}{60} \right)^2 \quad (٦-١٤)$$

(٦)

نستطيع الآن أن نستخدم عزم الحدافة المناظر بدلاً من عزم القصور الذاتي على كل محور دوران في الحالة السابقة (حيث نجد أن عزوم الحدافة المناظرة

يوضع عمود الإدارة ، كما هو بكل ما عليه من أثقال المنتج ، على كرسين ، بحيث يراعى أن تكون مقاومة الاحتكاك أقل ما يمكن (أو يستخدم بعد ذلك معامل لأخذ فعل الاحتكاك في الاعتبار) . وفي أثناء هبوط الثقل W كيلو جرام ، بفعل الجاذبية الأرضية ، يدور المنتج الذي قطره d_a متر ويفك الحبل الملفوف حوله ، المربوط في نهايته الثقل . يرصد الزمن t بالثانية اللازم لهبوط الثقل المسافة h متر حتى لحظة اصطدامه بالأرض .

تحتسب قيمة GD^2 كما يأتي : يبدأ الثقل حركته من السكون عند انطلاقه من أعلى نقطة ، ويصل إلى أقصى سرعة له عند اصطدامه بالأرض ، وتزداد السرعة ازديادا خطيا تحت تأثير عجلة ثابتة a في أثناء ذلك ، مقدارها $a = g \left(1 - \frac{S}{W} \right)$ ، حيث S قيمة الشد في الحبل (MKS units) . وتكون السرعة عند اصطدام الثقل بالأرض v ، كما يبين شكل (٦ - ٦) ب هي ضعف السرعة المتوسطة التي تساوي $\frac{h}{t}$ أي أن :

سرعة الثقل عند اصطدامه بالأرض (وهي السرعة المحيطية للمنتج)

$$v = \frac{2h}{t} \text{ m / sec}$$

سرعة دوران المنتج المناظرة n_m لفة في الدقيقة

$$n_m = \frac{60 v}{\pi d_a} \quad (٦ - ١٩)$$

وتكون طاقة الحركة الكامنة في الكتل الدائرة على محور إدارة المحرك في هذه اللحظة عبارة عن التغير الذي حدث في طاقة الوضع للثقل W بهبوط المسافة h . وبلاستعانة بالمعادلة (٦ - ١٣) للتعبير عن طاقة الحركة الكامنة ، بدلالة الوزن الاعتباري G والقطر الاعتباري D لوسيلة التحريك منسوبة كلها إلى عمود إدارة المحرك ، نجد أن :

$$Wh = \frac{1}{2} \frac{G}{g} \left(\frac{\pi D n_m}{60} \right)^2$$

بالتعويض عن n_m بالقيمة التي حصلنا عليها :

$$\therefore (GD^2)_d = \frac{7200 g Wh}{\pi^2 n_m^2} \quad Kgm^2 \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} (٦-٢)$$

$$(GD^2)_d = \frac{g W d_a^2 t^2}{2h} \quad Kgm^2 \quad \text{أو} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\}$$

نضرب مثلاً بحالة يكون فيها :

$$d_a = 10 \text{ cms} \quad t = 20 \text{ sec} \quad h = 1 \text{ m} \quad W = 2 \text{ Kg}$$

$$v = \frac{2h}{t} = \frac{2 \times 1}{20} = 0.1 \text{ m/sec} ,$$

$$n_m = \frac{60v}{\pi d_a} = \frac{60 \times 0.1}{\pi \times 0.1} = 19.1 \text{ rev/min}$$

$$(GD^2)_d = \frac{7200 g Wh}{\pi^2 n_m^2} = \frac{7200 \times 9.81 \times 2 \times 1}{\pi^2 \times (19.1)^2}$$

$$= 39.3 \text{ Kgm}^2$$

$$\text{or} , (CD^2)_d = \frac{g W d_a^2 t^2}{2h} = \frac{9.81 \times 2 \times 0.01 \times 400}{2 \times 1}$$

$$= 39.24 \text{ Kgm}^2$$

وإذا أردنا حساب $(GD^2)_m$ للمنتج فقط نطبق المعادلة (١٧-٦)

حيث

$$(GD^2)_m = (GD^2)_d - 365 \frac{W v^2}{n_m^2}$$

$$365 \frac{W v^2}{n_m^2} = \frac{2 \times 0.01}{365} \times 365 = 0.02 \text{ Kg.m}^2$$

$$(GD^2)_m = 39.24 - 0.02 = 39.22 \text{ Kg.m}^2$$

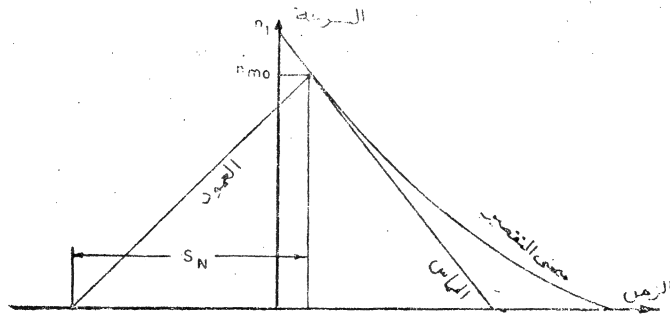
يلاحظ أن الجزء الأكبر من طاقة الوضع التي يفقدها الوزن W ، بهبوطه المسافة متر ، يتحول إلى طاقة حركة في المنتج الدائر ، بينما جزء صغير جدا هو الذي يتحول إلى طاقة حركة في الوزن نفسه ، يتمثل في سرعته ٠.١ متر/ الثانية التي اكتسبها من خلال سقوطه . وفي الحقيقة أن الوزن لو لم يكن معوقا بعزم القصور الذاتي الكبير نسبيا للمنتج ، نتيجة ربطه به ، وكان سقوطه بمفرده ، لكنت السرعة التي يصل إليها عبارة عن $v = \sqrt{2gh} = 4.43 \text{ م/ث}$ الثانية ، بالقياس إلى ٠.١ متر / الثانية كما وجدنا من قبل .

يمكن الحصول على قيمة تقريبية مناسبة لعزم الحدافة $(GD^2)_m$ للمحرك بإجراء التجربة التالية: يوصل المحرك ، بدون حمل على عمود إدارته ، إلى الينبوع وتقاس قدرة المدخل P_0 وات ، عندما يكون دأرا بسرعه المعتادة n_{mo} لفة في الدقيقة . تستهلك هذه القدرة في مفقودات الحديد P_{vfe} والمفقودات النحاسية الطفيفة P_{vcu} ، الناشئة عن تيار اللاحمل الصغير وكذلك في المفقودات الميكانيكية P_{mo} ، التي يمكن اعتبارها قدرة المخرج الميكانيكية على عمود إدارة المحرك في هذه الحالة . وعلى هذا الأساس يمكن إيجاد قيمة P_{mo} بضرب قيمة P_0 في قيمة معامل جودة المحرك المنخفض η_0 ، الذي نحصل عليه من منحني معامل جودة المحرك مع القدرة ، المعطى ضمن مواصفات التصميم للمحرك من المصنع . عند لحظة فصل المحرك من الينبوع يعمل عزم الدوران T_{mo} الناشيء عن المفقودات الميكانيكية P_{mo} عند سرعة الدوران n_{mo} على خفض سرعة المحرك ، تمهيدا لإيقافه تحت تأثير مقاومة الاحتكاك ويعمل عزم القصور الذاتي ، أو عزم الحدافة المضاد مع التقصير الناشيء عن انخفاض

السرعة بحيث يحدث توازن ديناميكي ، يتحقق بمعادلة الحركة الديناميكية التالية :

$$\begin{aligned}
 T_{mo} &= \frac{0.975 P_{mo}}{n_{mo}} = J_m \frac{d\omega_{mo}}{dt} \\
 &= \frac{(GD^2)_m}{4g} \frac{2\pi}{60} \frac{dn_{mo}}{dt} \\
 &= \frac{(GD^2)_m}{375} \frac{dn_{mo}}{dt} \text{ Joules} \quad (٦-٢٠)
 \end{aligned}$$

يمكننا إيجاد قيمة $\frac{dn_{mo}}{dt}$ ، من منحنى التقصير للمحرك (retardation curve) ، الذي نحصل عليه برصد سرعة المحرك مع الزمن الذي يمضي بعد لحظة الفصل ، وذلك بإيجاد ميل المماس للمنحنى عند السرعة n_{mo} . ويمكن الحصول على نتائج أكثر دقة برفع الضغط على المحرك بحيث تصل سرعته إلى n_1 (إذا كانت سرعته تتوقف على قيمة الضغط) ، أعلى قليلاً من n_{mo} ، ثم فصله من الينبوع وأخذ قراءات منحنى التقصير ، شكل (٦-٧) بذلك نحصل على عزم الخدافة المطلوب حيث يكون :



شكل (٦-٧)

$$(GD^2)_m = \frac{0.975 \times 375 \eta_0 P_0}{n_{mo} \frac{dn_{mo}}{dt}} \times \frac{365 \eta_0 P_0}{S_N} \quad (٦-٢١)$$

حيث S_N هو طول تحت العمود (length of subnormal) لمنحنى التقصير للمحرك ، كما هو مبين في شكل (٦-٧)

عند حساب عزم الخدافة الكلى لوسيلة التحريك منسوبا إلى عمود إدارة المحرك $(GD^2)_d$ يؤخذ $(GD^2)_m$ و $(GD^2)_1$ في الاعتبار فقط عادة مع ضرب الأول في العامل k ، الذى تتراوح قيمة بين ١ ر ١ ، ١٣ ، لأخذ تأثير صناديق التروس والطارات الموجودة فى وسيلة التحريك فى الحسبان . فى هذه الحالة يستعاض عن المعادلة (٦-١٧) بالمعادلة الآتية:

$$\begin{aligned} (GD^2)_d &= k (GD^2)_m + \frac{(GD^2)_1}{\varepsilon^2_1} \left[\varepsilon_1 = \frac{n_m}{n_1} \right] \\ &= k (GD^2)_m + 365 \frac{Wv^2}{n^2_m} \quad (٦-٢٢) \end{aligned}$$

$(GD^2)_1$ فى المعادلة (٦-٢٢) هى عزم الخدافة للحمل على محوره ، وبقسمتها على ε^2_1 تصبح منسوبة الى عمود ادارة المحرك ، بينما $(GD^2)_1$ فى المعادلة (٦-١٦) هى القيمة منسوبة الى عمود إدارة المحرك مباشرة .

يمكن استخدام المعادلتين (٦-١٨) و (٦-٢٢) للحصول على طاقة الحركة الكلية الكامنة فى جميع الأجزاء الدوارة فى وسيلة التحريك En_d

$$En_d = (GD^2)_d \frac{\pi^2 n^2_m}{7200g} = \left[k (GD^2)_m + \frac{(GD^2)_1}{\varepsilon^2_1} \right] \frac{\pi^2 n^2_m}{7200 g} \quad (٦-٢٣)$$

مثال محلولة ١ :

a 3-phase 6-pole delta connected induction motor is used in a drive for raising a weight of 6 tons at a speed of 1.5 m/sec in an arrangement similar to that in fig (5 —6). The motor is connected to a 3-phase 3000 V, 50 HZ supply. Find the line and phase currents of the motor, assuming an overall efficiency for the drive of 0.8 and a power factor of 0.82

سرعة التزامن في المحرك :

$$n_{ms} = \frac{60 f}{p} = \frac{60 \times 50}{3} = 1000 \text{ r.p.m.}$$

عزم الدوران اللازم بذله في المحرك بسبب حركة الثقل W ، باستخدام المعادلة (٩ - ٦) :

$$T_m = 9.53 \frac{W v}{\eta_c n_m} = 9.53 \times \frac{6000 \times 1.5}{0.8 \times 1000} = 107.5 \text{ Kg.m.}$$

قدرة المدخل للمحرك باستخدام المعادلة (١٠ - ٦) :

$$P_m = \frac{T_m n_m}{0.975} = \frac{107.5 \times 1000}{0.975} = 115200 \text{ W} = 115.2 \text{ KW}$$

يلاحظ أننا نستخدم سرعة دوران المجال المغناطيسي الدائر في المحرك
لأننا نحسب قدرة المدخل ، لا قدرة المخرج .

تيار الخط في المحرك :

$$I_L = \frac{115200}{\sqrt{3} \times 3000 \times 0.82} = 27.1 \text{ A}$$

التيار المرحلي في المحرك :

$$I_{ph} = \frac{27.1}{\sqrt{3}} = 15.62 \text{ A}$$

مثال محلول ٢ :

For the drive arrangement shown in fig (5-6), with motor directly connected to load shaft find the resultant fly-wheel moment referred to the motor shaft, assuming the following data : speed of motor shaft 720 r.p.m., Fly wheel moment of motor armature 10 Kg.m², diameter of crane-drum 1m and its flywheel moment 60 Kg.m². Speed of raising a 3 ton load is 0.9 m/sec.

$$n_l = \frac{60 \times v}{\pi d} = \frac{60 \times 0.9}{\pi \times 1} = 17.2 \text{ r.p.m.}$$

$$\epsilon_l = \frac{n_m}{n_l} = \frac{720}{17.2} = 41.8$$

باستخدام المعادلة (٢٢ - ٦) لإيجاد المطلوب ، مع اعتبار أن $k = 1.1$

$$\begin{aligned} (GD^2)_d &= 1.1 \times 10 + \frac{60}{(41.8)^2} + 365 \times \frac{3000 \times (0.9)^2}{(720)^2} \\ &= 11 + 0.03 + 17.15 = 28.18 \text{ Kg.m}^2 \end{aligned}$$

مثال محلول (٣) :

The input to the electric motor on no load in a special drive is 2.5 KW, when the motor shaft rotates at a speed of 980 r.p.m. The motor efficiency at this power consumption is supposed to be 0.7. If the speed of the drive drops from 1000 to 960 r.p.m. in 1.25 sec, when the supply voltage is slightly

raised and the motor is there after disconnected from the supply, find the equivalent flywheel moment of the drive referred to the motor shaft

$$\frac{dn_{mo}}{dt} = \frac{1000 - 960}{1.25} = \frac{40}{1.25} = 32 \text{ r.p.m./sec}$$

استخدام المعادلة (٢١ - ٦) نحصل على المطلوب :

$$(GD^2)_m = \frac{365 \eta_o P_o}{n_{mo} \frac{dn_{mo}}{dt}} = \frac{365 \times 0.7 \times 2.5 \times 10^3}{980 \times 320}$$

$$= 20.4 \text{ Kg.m}^2$$

(٦ - ٧) زمن البدء الذي يستغرقه المحرك الكهربى (أو وسيلة التحريك بأكملها) حتى تصل الى السرعة المعتادة

(Starting time taken by the motor, or the total drive, to attain normal speed)

يستغرق المحرك الكهربى وقتاً معلوماً حتى يصل الى سرعة الدوران العادية له . وتتوقف قيمة هذا الوقت على عزم دوران السكتل الموجودة على محور ادارة المحرك، وعزم دوران المحرك ، مما يترتب عليه تعجيل معين له . وتختلف قيمة وقت البدء (starting time) هذا اذا كان المحرك متصلاً بالآلة العاملة ، فى خلال فترة البدء ، أى قائماً بالحمل ، عما اذا كان يبدأ الدوران . بمفرده أى بدون الحمل ، ويكون الاختلاف ناشئاً عن تغير قيمة عزم دوران السكتل المعجلة (accelerated masses) فى الحالتين . ونظراً لأن هذه السكتل سوف تمتلك كميات من الطاقة الكامنة ، التى تتوقف قيمتها على السرعة التى سوف تدور بها فى النهاية ، كما أن جزءاً مماثل من الطاقة سوف يتبدد ، على كل حال ، مصاحباً لعملية البدء على شكل مفقودات حرارية ،

كما سبق بيانه بالنسبة للقفص السنجابي على العضو الدائر للمحرك التأثري صفحة (٨٨) في الباب الثاني ، فلا بد أن يمتلك المحرك قدرة معينة لكي تتم عملية البدء في زمن معين . كذلك يجب أخذ الاحتياطات اللازمة لتفادي تراكم الحرارة المذكورة ، بما يجعلها مصدر تلف لأي جزء من أجزاء المحرك ، أو الأجهزة المنظمة لحركته ، باستخدام الوسائل الفعالة لزيادة معدل تبديدها ، أو الحد من زيادة معدل توليدها ، هذا ويتعرض المحرك في خلال فترة البدء لظواهر التلاشي عادة (Transient phenomena) ، مما يستلزم التأكيد على دراسة معدلات نمو التيار المسحوب من الينبوع ، والمجال المغناطيسي المصاحب لوجوده ، للاطمئنان على عدم تعدى أي منهما الحدود المسموح بها ، فلا يصبح خطراً على أي جزء من أجزاء المحرك ، أو إحدى الأجهزة المتصلة . وتجدر الإشارة هنا مرة أخرى الى ان مدى الخطورة الناشئة عن سريان تيار معين في جزء من أجزاء الدائرة الكهربائية ، بسبب الحرارة التي يبددها ، او المجال المغناطيسي الذي يصنعه ، لا تتوقف على حد معين لقيمته فقط ، وإنما يجب أخذ الزمن ، الذي يستمر سريان التيار فيه عند هذا الحد ، أيضاً في الاعتبار (راجع الباب الثاني صفحة ٨٩) .

إذا افترضنا أن المحرك يمكن أن يبذل عزم دوران يكون متوسط قيمته في خلال فترة البدء هو T_{st} كيلوجرام . متر ، وأن عزم دوران الحمل المضاد على عمود ادارة المحرك هو T_1 ، بنفس الوحدات ، وأن سرعة الدوران التي يصل اليها في النهاية هي n_m لفة في الدقيقة ، في خلال زمن البدء t_{st} ثانية ، فانه قياساً على المعادلة (١٧ - ٢) صفحة ٢٦٩ من كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربائية نجد أن : $(t_{st} = \theta_m)$

$$t_{st} = \frac{(GD^2)_d}{36.5} \times \left(\frac{n_m}{100} \right)^2 \times \frac{1}{n_m (T_{st} - T_1)} \quad 975$$

$$t_{st} = \frac{(GD^2)_d \times n_m}{375 (T_{st} - T)} \quad (٦-٢٤)$$

وبفرض أن التعجيل يتم بمعدل منتظم ، فإننا نستطيع أن نحصل على الزمن $t_{st \ 12}$ اللازم لارتفاع السرعة من n_1 إلى n_2 على نمط المعادلة (٦-٢٤)،
حيث :

$$t_{st \ 12} = \frac{(GD^2)_d \times (n_2 - n_1)}{375 (T_{st} - T_1)} \quad (٦-٢٥)$$

وعندما يكون بدء المحرك بدون حمل ، ويكون عزم الدوران الذي يبذله في خلال فترة البدء يساوى عزم دوران الحمل الكامل، الذي يستهلك المحرك على أساسه مقنن قدرته P_m كيلووات، فإن الزمن الذي يستغرقه في البدء هو عبارة عن ثابت الزمن الميكانيكي (mechanical time constant) للمحرك، الذي استنبطت على أساسه المعادلة (١٧-٢) المشار إليها آنفاً ،
حيث نجد أن :

$$\theta_m = \frac{(GD^2)_m}{36.5} \times \left(\frac{n_{mo}}{100} \right)^2 \times \frac{1}{P_m} \quad (٦-٢٥)$$

مثال محلول (٤) :

The carrying capacity of a certain crane is 30 tons, and its own weight is 39 tons. It is driven by an electric motor with 26 KW rated power, which imparts steadily a speed of 100 m/min to the weight carried by the crane, when it rotates with full load at a speed of 700 r.p.m. Find the starting time of the whole drive, if the motor is started with double the full load torque, and its armature has a fly wheel moment of 12 Kg.m². What is the least distance, through which the load

should be moved , in the starting period , before it attains the given steady speed .

سوف يتحرك الوزن ($W = 30 + 39$) كيلو جرام (وزن الثقل المحمول بالونش مضافا إليه الوزن الذاتي للونش) ، بعد انتهاء فترة البدء ، بسرعة ثابتة v مقدارها ١٠٠ متر في الدقيقة ، فيكون عزم الحداقة المناظرة ، منسوبا إلى عمود إدارة المحرك ، باستخدام الشطر الثاني للمعادلة (٢٢ - ٦) :

$$\frac{(GD^2)_1}{\epsilon_1^2} = 365 \frac{Wv^2}{n_m^2} = 365 \frac{69000 \left(\frac{100}{60}\right)^2}{(700)^2}$$

$$= 142.5 \text{ Kg.m}^2$$

باستخدام المعادلة (٢٢ - ٦) ، مع قيمة k عبارة عن ١١ ، نحصل على عزم الحداقة الكلى لوسيلة التحريك منسوبا إلى عمود إدارة المحرك ، حيث :

$$(GD^2)_d = 1.1 \times 12 + 142.5 = 155.6 \text{ Kg.m}^2$$

نحصل على عزم دوران المحرك T_m المناظر لمقن قدرته $P_m = 26 \text{ KW}$

حيث

$$T_m = \frac{975 \cdot P_m}{n_m} = \frac{975 \times 26}{700} = 36.25 \text{ Kg.m} .$$

ونظرا لأنه منصوص على أن المحرك يبذل ضعف عزم دورانه المقن في خلال فترة البدء ، فانتا نستطيع الحصول على قيمة زمن البدء t_{st} من المعادلة (٢٤ - ٦) باستخدام $2 T_m$ مكافئا لعزم دوران البدء في المحرك T_{st} . ويكون عزم دوران الحمل المضاد T_l مساويا لعزم الدوران المقن للمحرك T_m ، بحيث يصبح ($T_{st} - T_l$) مساويا T_m في النهاية

$$T_{st} = \frac{(GD^2)_d \times n_m}{375 T_m} = \frac{155.6 \times 700}{375 \times 36.25} = 8.02 \text{ secs}$$

أى أن المحرك يستغرق من الوقت ٨.٠٢ ثانية ، فى فترة بدئه، حتى يصبح دأئرا بسرعة ٧٠٠ لفة فى الدقيقة ، وهو يأخذ الحمل الكامل البالغ ٢٦ كيلوات من الينبوع ، ويبذل عزم دوران مقداره ٣٦٢٥ كيلوجرام . متر لتحريك الثقل المعلق فى الونش، بسرعة ثابتة مقدارها ١٠٠ متر فى الدقيقة . ومن الواضح أن الثقل يبدأ حركته من الصفر ، ويتحرك بعجلة منتظمة ، كما سبقت الإشارة اليه فى المعادلة (١٩ - ٦) فيكون متوسط سرعته فى خلال فترة البدء نصف السرعة النهائية ، أى ٥٠ متر/الدقيقة، مما يجعله يقطع مسافة مقدارها $(8.02 \times \frac{50}{60} \approx 6.7)$ متر فى هذه الفترة . وهذا يعنى أن الونش لن يتمكن من تحريك الثقل بالسرعة المعطاة وهى ١٠٠ متر/الدقيقة، الا اذا زادت مسافة التحريك عن ٦.٧ متر .

تعتبر الطريقة السابقة للحصول على زمن البدء تقريبية فى الواقع ، وهى تعتمد أساسا على افتراض أن عزم الدوران الذى يبذله المحرك T_{st} ، فى خلال فترة البدء ، ثابت القيمة ، وهى عبارة عن نسبة معينة من عزم دوران الحمل الكامل (الضعف فى المثال السابق) ، كما أن عزم دوران الحمل هو الآخر ثابت القيمة (يساوى عزم دوران الحمل الكامل فى المثال السابق) ، بحيث يصبح عزم الدوران المعجل للكتل الدائرة على غمود الإدارة ذا قيمة ثابتة هى الفرق بين الاثنين $T_{st} - T_l$. وهذا يؤدى الى حدوث تعجيل ثابت ، وتغير منتظم فى السرعة ، مما يمكننا من وضع $\frac{n}{t}$ بدلا من $\frac{dn}{dt}$ فى المعادلة (٢٤ - ٦) ، ثم استخدامها للحصول على زمن البدء t_{st} . أما فى حقيقة الأمر فإن المحرك يمتلك عادة منحنى معروف لعزم الدوران مع السرعة، ويختلف مجراه على حسب وجود اضافات (مقاومات فى أغلب الأحيان) ، أو تعديلات فى احدى دوائره الكهربائية ، ولا يكون عزم الدوران ثابت القيمة مع السرعة

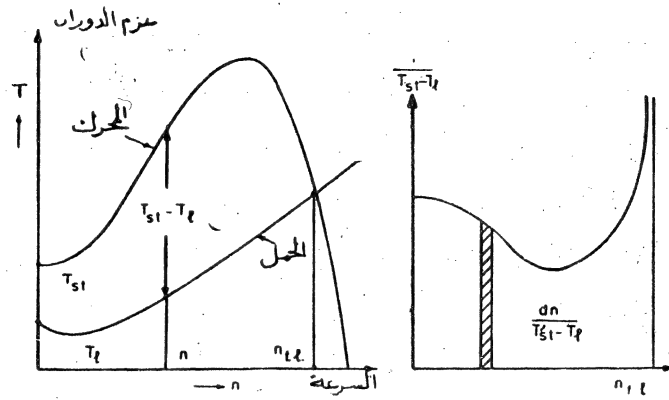
الا فى حالات قليلة ، بل ان الأمر قد يتطور الى حد عدم امكان تحديد علاقة رياضية تربط بين عزم الدوران والسرعة ، مما قد يساعد على تبسيط الأمور . والمثل واضح على ذلك بالنسبة للمحرك التائيرى ، الذى هو من أوسع المحركات انتشارا فى مجال التحريك الكهربى ، وسوف نرى أن المعادلة الرياضية التى تربط بين عزم دورانه وسرعته ليست سهلة التناول ، اذا أردنا توخى الدقة فى الحصول على زمن البدء ، باستخدام المعادلة الأساسية دون اللجوء الى الطرق المبسطة والتقريب . اجمالا لما سبق فاننا نستطيع أن نحصل على زمن البدء باحدى الطريقتين الآتيتين :

١ — استخدام المعادلة (٢٤ — ٦) دون اللجوء الى افتراضات لتسهيل الأمور ، وفي هذه الحالة نجد أن :

$$t_{st} = \int_0^{n_m} \frac{(GD^2)_d \, dn}{375 (T_{st} - T_1)} \quad (٢٦ - ٦)$$

وسوف يكون من الضروري حينئذ وجود علاقة رياضية للمقدار $(T_{st} - T_1)$ كدالة للسرعة n ، بحيث يمكن إجراء التكامل الوارد فى المعادلة (٢٦ - ٦) ، والحصول على القيمة المطلوبة لزمن البدء t_{st} . وإلا فاننا نضطر فى معظم الأحيان الى استخدام الطريقة البيانية للحصول على قيمة التكامل ، وذلك بإيجاد المساحة تحت المنحنى الذى يعطى $\frac{1}{(T_{st} - T_1)}$ كدالة للسرعة n ، كما هو مبين فى شكل (٨ - ٦) لحالة محرك تائيرى مع مروحة . وهذا بطبيعة الحال يستدعى معرفة مجرى كل من المنحنين T_{st} كدالة للسرعة n ، T_1 كدالة لنفس السرعة .

٢ — استخدام الطريقة المبينة سابقا ، والتى استخدمت لحل المثال ٤ ، ونحتاج فى هذه الحالة الى افتراض قيمتين متوسطتين ثابتتين ، تحل احداها



(شكل ٨-٦)

(وهي T_{st}) محل عزم دوران المحرك المتغير في خلال فترة البدء ، ويكافئ فعلها فعله ، وتحل الثانية (وهي T_L) محل عزم دوران الحمل المضاد ، وتؤدي ما يناظر عمله . وقد يمكن الاتفاق عموماً على القيمتين T_L ، T_{st} ، بالنسبة لأنواع معينة من المحركات والأحمال ، وذلك بدلالة بعض القيم المحددة والمعروفة على المنحنيات الفعلية الخاصة بكل منها . فبالنسبة لمحركات التيار المستمر يتأرجح عزم الدوران في خلال فترة البدء بين قيمتين ، أحدهما صغير T_{min} ، والأخرى قصوى T_{max} ، وذلك تبعاً لتغير تيار البدء (عند إخراج قطاعات من مقاومة البدء) ، ويمكننا على هذا الأساس اعتبار أن $T_{st} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$. وبالنسبة للمحركات التأثيرية يمكننا أن نعتبر أن $T_{st} = \frac{T_{max} + T_s}{2}$ ، حيث T_s هو عزم دوران المحرك لحظة البدء ، T_{max} هي قيمة النهاية العظمى لعزم الدوران ، كما سبق بيانه بالنسبة لشكل (٤-١) .

عندما تحتوي وسيلة التحريك على أجزاء دوارة ، وأجزاء تتحرك حركة خطية، كما هو الحال بالنسبة لآلات الرفع كالأوناش مثلاً، فإنه يمكن

حساب عزم الحداقة الكلى منسوباً الى عمود ادارة المحرك من المعادلة (٢٢ - ٦) بدلالة كل من الثقل المرفوع W وسرعته المنتظمة v . وقد استطعنا الحصول على عزم الحداقة المكافئ للثقل بمساواة الشد في الحبل S الذى يرفع الثقل بالوزن W ، باعتبار أن الحركة منتظمة. لذلك يجب مراعاة أنه عندما يكون الثقل متحركاً بعجلة منتظمة a ، أى بسرعة متغيرة تغيراً منتظماً، فإن الشد S يحل محل W في المعادلتين (١٧ - ٦)، (٢٢ - ٦). ويمكننا الحصول على قيمة الشد S بدلالة للعجلة المنتظمة a وعجلة الجاذبية الأرضية والوزن W ، على حسب ما اذا كان الثقل متحركاً الى أعلى أو الى أسفل، من معادلة الحركة على النحو التالى :

(١) الحركة الى أعلى :

$$S = W + \frac{W}{g} a = W \left(1 + \frac{a}{g} \right) \text{ Kg} \quad (٢٢ - ٦)$$

(ب) الحركة الى أسفل :

$$S = W - \frac{W}{g} a = W \left(1 - \frac{a}{g} \right) \text{ Kg} \quad (٢٢ - ٦) \text{ ب}$$

لذلك فانه عندما تكون سرعة الحركة الخطية v متغيرة، فان عزم دوران الحداقة المكافئ للثقل W ، الذى يجب أن يحل محل الحد $\frac{Wv^2}{n_m^2}$ في المعادلة (٢٢ - ٦)، عبارة عن

$$\left(GD^2 \right)_1 = 365 \frac{Sv^2}{n_m^2} \quad (٢٢ - ٦) \text{ ب}$$

حيث تعوض قيمة S من المعادلة (٢٢ - ٦) أ، وتتوقف قيمة v على قيمة العجلة الخطية a

مثال محلول (٥) :

a 3 - phase 4 - pole induction motor is rated 10 KW on a 50 HZ supply , and rotates at full load With a speed of 1450 r.p.m. , when Contained in a drive having a flywheel moment referred to the motor shaft of 10 Kg.m.² The motor has a ratio rotor phase esistance to stand still reactance of 0.13 and a short circuit current 5times the full load current . The load on the motor Consists mainly of a load weighing 20 tons, which has to be raised from rest With a velocity not exceeding 1.2 m/sec . If the motor starts on load and is fully loaded at the end of the starting period, find the time taken by the motor to attain its full speed and the Corresponding distance moved by the weight. Comment your result.

تصل سرعة الثقل المرفوع في نهاية فترة البدء للمحرك t_{st} الى اكبر قيمة لها ، وهي ١.٢ متر / الثانية في هذه الحالة ، وذلك بتعجيل منتظم . فاذا كانت h هي المسافة بالامتار التي يرتفع فيها الثقل في أثناء فترة البدء ، فان

$$t_{st} = \frac{2h}{v_m}$$

حيث v_m هي السرعة القصوى ، كما سبق بيانه . تكون قيمة التعجيل المنتظم a متر/الثانية^٢ في هذه الحالة عبارة عن

$$a = \frac{v_m^2}{2h} = \frac{v_m}{t_{st}} \quad (٢٧ - ٦)$$

عزم دوران الحمل الكامل للمحرك :

$$T_{fl} = \frac{975 \times 10}{1460} = 6.68 \text{ Kg.m.}$$

نحصل على معامل الإنزلاق S_m عند قيمة النهاية العظمى لعزم الدوران T_{max} من المعادلة

$$S_m = \frac{R_2}{X_{20}} = 0.13 = \alpha$$

نحصل على معامل الإنزلاق S_{fl} عند عزم دوران الحمل الكامل T_{fl} من المعادلة

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1500 - 1450}{1500} = 0.0333$$

$$\left[n_s = \frac{60 \times 50}{2} = 1500 \text{ r.p.m.} \right]$$

نحصل على T_{max} قيمة النهاية العظمى لعزم الدوران من المعادلة

$$T_{max} = T_{fl} \frac{S_{fl}^2 + \infty^2}{2S_{fl} \infty} = 6.65 \frac{11.1 \times 10^{-4} + 169 \times 10^{-4}}{86.5 \times 10^{-4}} = 14.3 \text{ Kg.m.}$$

نحصل على T_s عزم دوران البدء من المعادلة:

$$T_s = \left(\frac{I_{sc}}{I_{fl}} \right)^2 S_{fl} \times T_{fl} = 25 \times 0.0333 \times 6.68 = 5.725 \text{ Kg.m.}$$

وبذلك يمكننا أن نعتبر قيمة ثابتة مكافئة لعزم الدوران في خلال فترة البدء T_{st} ، كما سبقت الإشارة إليه ، على النحو الآتي :

$$T_{st} = \frac{T_{max} + T_s}{2} = \frac{14.3 + 5.725}{2} = 10 \text{ Kg.m.}$$

باستخدام المعادلة (٢٢ - ٦) نحصل على عزم دوران الحدافة لوسيلة النقل

بأكلها $[(GD^2)_d]$ منسوباً إلى عمود ادارة المحرك (باعتبار أن $v = v_m$)
وأن $(k = 1.2)$

$$(GD^2)_d = 1.2 \times 10 + 365 \times \frac{20000 \times (0.2)^2}{(1450)^2}$$

$$= 12 + 5 = 17 \text{ Kg.m}^2$$

عندما يصبح المحرك محملاً بالحمل الكامل عند نهاية فترة البدء ، كما هو
منصوص عليه في المسألة ، فمعنى هذا أن عزم دوران الحمل المضاد T_l يساوى
عزم دوران المحرك نفسه عند الحمل الكامل T_{fl} ، أى يساوى ٦٠٦٨
كيلوجرام متر . باستخدام المعادلة (٢٤ - ٦) نحصل على زمن البدء t_{st} :

$$t_{st} = \frac{17 \times 1450}{375 \times (10 - 6.68)} = \frac{17 \times 1450}{375 \times 3.32} = 20.4 \text{ sec}$$

نحصل على المسافة التى يتحركها الثقل فى خلال فترة البدء من
من المعادلة (٢٧ - ٦)

$$h = \frac{v_m t_{st}}{2} = \frac{1.2 \times 20.4}{2} = 12.24 \text{ m}$$

وهذا يعنى أن الثقل لن يبدأ فى التحرك حركة منتظمة بقيمة النهاية
العظمى للسرعة المعطاة وهى ١٢ م / الثانية ، الا اذا زادت مسافة التحريك
عن ١٢.٢٤ متر . أى أن الثقل يظل فى حالة تعجيل طوال رفعه مسافة
١٢.٢٤ م / الثانية ، منذ بدء الحركة .

(٨ - ٦) حساب زمن الفرملة لوسيلة التحريك الكهربى :

(Calculation of the time of braking for an electric drive)

يصبح الحصول على زمن البدء ، وكذلك زمن الفرملة الذى سناقشه في

هذا البند، ضرورة تختمها الاعتبارات الاقتصادية (economical considerations) بالنسبة لبعض وسائل التحريك ، التي تكون جزءاً أساسياً (an essential part of) من مؤسسة صناعية كبيرة (a big industrial foundation) تتطلب العمليات الانتاجية الأساسية فيها (basic production processes) عكس اتجاه دوران وسائل التحريك بصورة منتظمة (in a regular manner) عدداً معيناً من المرات في زمن محدد ، أى بتردد محسوب (with a predetermined frequency) . ومن البديهي أن زمن البدء وزمن القرملة لوسيلة التحريك سوف يؤثران معاً على الطاقة الانتاجية (production unit) ، التي تمثل هذه الوسيلة جزءاً منها ، حيث يمكن اعتبار كل من فترتي البدء والقرملة من معوقات الانتاج في هذه الحالة ، بما تمثلانه من زمن مفقود ، يتسبب في خفض معدلات الانتاج (production rate) للوحدة المعنية . وإن التعرض لتأثير كل من فترتي البدء والقرملة على الاعتبارات الاقتصادية ، التي يجب أخذها في الحسبان ، عند انشاء مثل هذه المؤسسات ، يعتبر خارجاً عن نطاق بحث هذا المؤلف ، ولكننا نريد أن نلفت النظر فقط الى ضرورة مراعاة ذلك ، مع استنباط ومناقشة العلاقات التي تحدد كل من زمني البدء والقرملة ، والاشارة الى بعض الاعتبارات المفيدة في هذا الاتجاه . فيمكن على سبيل المثال أن نستنبط ، بالرجوع الى المعادلة (٢٦ - ٦) ، وأشباهاها ، أنه يمكن اختصار زمن البدء لوسيلة التحريك بزيادة عزم دوران البدء ، مما يستلزم زيادة قدرة محرك الوسيلة بطبيعة الحال . ولكننا لا نستطيع التكهّن بتأثير ذلك على اقتصاديات وحدة الانتاج التي تعمل فيها الوسيلة ، الا إذا توفرت المعلومات الكاملة ، التي تمكننا من الموازنه الدقيقة بين تأثير الزيادة في عزم المحرك الجديد الذي نحتاج اليه في هذه الحالة ، وتأثير الكسب في الوقت الذي ينشأ عن اختصار زمن فترة البدء على معدلات الانتاج ، وبالتالي على تكاليف انتاج الوحدة من السلعة المنتجة ، التي تتخذ عموماً أساساً لكل حساب . ولا يسعنا الاستكمال هذا الموضوع ، إلا أن نبين فيما يلي طريقة حساب زمن القرملة في وسيلة التحريك الكهربائي .

إن زمن الفرملة t_{br} ، شأنه في ذلك شأن زمن البدء تماما ، يتوقف على كل من عزم الحدافة الكلي لوسيلة التحريك ، منسوباً إلى عمود إدارة المحرك $(GD^2)_d$ ، الذي يمكن الحصول عليه بنفس الطريقة التي اتبعت في حساب زمن البدء ، ثم عزم دوران الفرملة T_{br} ، الذي يتسبب في تقصير الحركة في خلال فترة الايقاف ، مما يجعلنا نستطيع حساب زمن الفرملة (time of braking) ، على نفس المنوال الذي اتبعناه في حساب زمن البدء ، وذلك بمحاكاة المعادلة (٢٦ - ٦) ، فنجد أن :

$$t_{br} = \int_{n_m}^0 \frac{(GD^2)_d dn}{375 T_{br}} \quad (٦ - ٢٨)$$

وفي هذه الحالة لا بد من الحصول على T_{br} كدالة السرعة ، في أثناء فترة الفرملة ، كما كان الأمر بالنسبة للمعادلة (٢٦ - ٦) عند حساب زمن البدء بها ، ونشير في هذا الصدد إلى ما نشره المؤلف من دراسات في موضوعي بدء وفرملة المحرك التأثيرى ثلاثى المراحل ، كما هو مبين في قائمة المراجع في نهاية الكتاب . هذا وإذا أمكن الحصول على قيمة مكافئة وثابتة لعزم الدوران الفرملي t_{br} ، واعتبار التقصير منتظماً تحت تأثير هذا العزم في خلال فترة الفرملة ، يمكن الحصول على زمن الفرملة t_{br} بمحاكاة المعادلة (٢٤ - ٦) فنجد أن :

$$t_{br} = \frac{(GD^2)_d \times n_m}{375 T_{br}} \quad (٦ - ٢٩)$$

قد يستخدم عزم دوران الحمل المضاد للمساعدة في فرملة المحرك ، وفي هذه الحالة يحتوى عزم الدوران الفرملي T_{br} ، علاوة على عزم دوران التقصير الناشئ عن عزم الحدافة المكافئ للكتل الدائرة ، منسوباً إلى عمود إدارة المحرك ، على عزم دوران الحمل T_I ، ويمكن أن نحتاج لهذا الغرض إلى استخدام المعادلة (٢٢ - ٦)

لايجاد عزم الدوران الفرملى بدلالة عزم دوران الحدافة الكلى للكتل الدائرة والحمل معا منسوباً الى عمود ادارة المحرك . هذا وسوف نخصص فيما بعد بعض البنود لدراسة الفرملة بالطرق الكهربائية (Electric Braking)
 البدء بعزم دوران متناقص خطياً مع الزمن (Starting with a linear decreasing Starting torque) تشترك المحركات التى تمتلك خاصية التوازي (Shunt Characteristics) ، مثل محرك التوازي للتيار المستمر ، والمحرك التآثيرى ثلاثى المراحل ، عند وجود مقاومه كبيره فى دائرة العضو الدائر ، بأن عزم البدء عند البدء يكون كبير . . . تناقص خطياً حتى يصل المحرك الى سرعته الدوران المعتاده فإذا كان البدء بدون حمل ، فإن عزم الدوران المضاد يكون مقتصر على عزم دوران التقصير الناشئ عن عزم القصور الذاتي للكتل الدائرة على محور ادارة المحرك ، وفي هذه الحالة تزداد السرعة على منحنى أسى (exponential curve) تماماً كما يحدث بالنسبة لنمو التيار الكهربى فى دائرة حثية ، فتكون العلاقة بين السرعة n عند أية لحظة t بعد البدء ، وسرعة المحرك المعتادة بدون حمل n_0 على هذا المنوال هي :

$$n = n_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\theta_0}} \right) \quad (٦-٣٠)$$

$$\theta_0 = \frac{GD^2 n_0}{375 T_0} \quad \text{حيث} \quad (٦-٣١)$$

. يكون θ_0 ، فى هذه الحالة ، هي الزمن الذى يصل فيه السرعة إلى قيمتها n_0 . لو استمر عزم دوران البدء عند القيمة T_0 بدون تناقص وقياساً على نمو التيار فى الدارة الحثية ، التى شبهنا بها تزايد السرعة ، فإن θ_0 تناظر ثابت الزمن ، ويمكن أن نطلق عليها ثابت زمن البدء للمحرك انظر صفحة ١١٩ من كتاب هندسة الآلات الكهربائية للمؤلف (starting time constant) . هذا وتصل سرعة المحرك ، مع تناقص عزم الدوران البدء خطياً كما هي الحال ، فعلاً إلى ٦٣٦ فى المائة من سرعة الالام n_0 بعد مرور زمن مقداره θ_0 . وبعبوض T_{01} ، عزم دوران المحرك الذى يبذله عند الحمل الكامل ،

في المعادلة (٣١ - ٦) نحصل على ثابت الزمن الميكانيكي θ_m للمحرك ، كما سبق لنا تعريفه ، (صفحة ٢٦٨ من كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربائية للمؤلف) ، حيث :

$$\theta_m = \frac{GD^2}{375} \frac{n_0}{T_{fl}} \quad (٦-٣٢)$$

(٩ - ٦) الفرملة بالوسائل الكهربائية : (Electric Braking).

إلى جانب حاجتنا إلى الفرملة لايقاف الكتل المتحركة (دائرياً أو خطياً) ، فقد نحتاج إليها أيضاً للحد من السرعة في حالة الأجسام التي تتحرك هابطة على منحدر ، أو تهوى تحت تأثير الجاذبية ، حيث تمتلك على حسب موقعها الابتدائي (Initial Position) كميات كبيرة من طاقة الجهد (Potential Energy) بحكم تأثير الجاذبية الأرضية عليها ، التي يمكن أن تتحول إلى طاقة حركة (Kinetic Energy) وتكسبها سرعات هائلة . وقد يلزم في هذه الحالة بذل عزم دوران كبير ولفترات طويلة ، للتأثير على الكتل المتحركة بعجلة تقصير (retardation) لمنع زيادة سرعتها بعد الحد المنشود. ويمكن الحصول على عزم دوران التقصير هذا باستخدام وسائل الفرملة الميكانيكية (mechanical braking) أو وسائل الفرملة الكهربائية (Electric braking) . وتمتاز الوسائل الكهربائية عن قرينتها الميكانيكية بما يأتي : ١ - تحتاج الوسائل الكهربائية إلى جهود وتكاليف أقل كثيراً للعناية بالأجهزة المستخدمة وصيانتها ، ٢ - النظافة التامة المستحبة لعدم وجود مخلفات نتيجة لتآكل بعض الأجزاء بفعل الاحتكاك الشديد اللازم في حالة الفرملة الميكانيكية ، ٣ - يمكن السيطرة بطريقة أفضل على كميات الحرارة ، المتخلفة عن عملية تحول طاقة الحركة الكبيرة أثناء الفرملة بالوسائل الكهربائية ، وذلك عن طريق تنظيم وسائل تبديدها ، بعد حصرها في أماكن مناسبة ، باستخدام المقاومات المجزأة خصيصاً لهذا الغرض . كما يمكن في معظم الحالات تجهيز الوسائل اللازمة

لإعادة تحويل جزء كبير من طاقة الحركة المراد تبديدها في أثناء عملية الفرملة، وتغذيته مرتجعا (fed back) الى ينبوع القدرة ، ويطلق على هذه الطريقة اسم الفرملة بالتوليد المرتجع (Regenerative Braking) ٢ - يمكن الحصول على عجلة تقصير أصغر كثيرا في حالة الفرملة الكهربائية ، بحيث يتم الايقاف بتدرج غاية في النعومة ، لا تحدث فيه عملية الرج ، التي تضايق الاشخاص ، وهي من أهم خصائص الفرملة الميكانيكية .

ولكننا مع ذلك نلاحظ أن الفرملة الكهربائية لا تستطيع في الغالب أن تهى لنا عزم دوران امساك (Holding torque) ، ولا بد أن نلجأ في معظم الأحيان الى الاستعانة بفرامل الامساك الميكانيكية (Mechanical holding brakes) مع الحصول على عزم دوران التقصير كهروديناميكيا (electrodynamically) . كذلك يجب عمل دراسة مقارنة من الناحية الاقتصادية عند الموازنة بين كل من وسيلتي الفرملة ، بغرض استخدامها في مشروع معين ، لأن وسائل الفرملة الكهربائية قد تحتاج الى اتفاق زائد بسبب الأجهزة الإضافية المطلوبة لها ، كما أن مقنن قدرة المحرك قد لا تصبح كافية عندما يعمل كمولد لتمام الفرملة بالتوليد المرتجع .

يمكن أن تتم الفرملة كهربيا بالاستعانة بالمحرك الكهربى المستخدم في وسيلة التحريك ، بعد عمل التعديلات اللازمة في توصيلاته ، كما يمكن أن تتم باستخدام فرملة تيارات اعصارية (Eddy - current brake) منفصلة . وسوف نقتصر في هذه الدراسة على الطريقة الأولى ، حيث توجد أنواع من الفرملة ، التي يمكن أن تستخدم جميعها مع كل أنواع المحركات شائعة الإستعمال ، وهي :

١ - الفرملة بالتوليد المرتجع (Regenerative Braking) و ٢ - الفرملة ديناميكية أو باستخدام المقاومة Dynamic or rheostatic braking

و - الفرملة بالتيار المعكوس أو التبديل (Plugging or reverse - current braking) .

في حالة الفرملة بالتوليد المرتجع يتم تشغيل المحرك كمولد ، مع استمرار اتصاله بالذبوع ، فيقوم بتحويل طاقة الحركة ، الكامنة في الكتلة الدائرة على عمود الإدارة ، إلى طاقة كهربية ويغذيها بصورة مرتجعة إلى الذبوع . ولا تحتاج عملية الفرملة بالتوليد المرتجع ، في معظم الاحوال ، إلى اجراء عمليات مفتاحية (Switching operations) خاصة ، ما لم تكن في حاجة إلى تغيير السرعة عند بدء الفرملة . وثلفت الانتباه ، في هذا الصدد ، إلى أن معظم الآلات الكهربائية تمر بنعومة تامة (quite smoothly) من حالة التحريك (motoring) إلى حالة التوليد (generating) اذا ما سيطر على حركتها عزم دوران الحمل (over driven by the load) .

وعند استخدام الفرملة الديناميكية يتم أيضا تشغيل المحرك كمولد ، ولكنه بدلا من ارجاع الطاقة التي يولدها يبددها في هذه الحالة ، على شكل حرارة في مقاومات ، قد تكون معدة ومجهزة لهذا الغرض ، كما يمكن استخدام ملفات الآلة أو المقاومات المتصلة بها ، اذا أمكن تهيئتها من الأصل لأداء هذه المهمة الجانبية أيضا .

أما في حالة الفرملة بالتيار المعكوس أو التبديل ، فإن المحرك ، بعد فصله من الذبوع مباشرة ، يعاد توصيله اليه في التو ، مجزأ بحيث يحاول الدوران في الاتجاه المضاد لاتجاه دورانه أثناء التحريك ، فيعمل على إيقاف الحمل . واذا لم يفصل المحرك من الذبوع في اللحظة المناسبة ، بعد إعادة توصيله للفرملة ، فسوف يقوم بتحريك الحمل في هذا الاتجاه المضاد . فاذا لم يكن ذلك مطلوبا ، فمن الضروري تهيئة المتعم المناسب (suitable relay) ، الذي يقوم بتشغيل قاطع الدائرة ، لحظة وقوف المحرك ، لفصله عن الذبوع . ويلاحظ أننا نحتاج في هذا النوع من الفرملة إلى وسائل خاصة لتبديد كل من الطاقة الكهربائية

المأخوذة من الينبوع ، لاتمام القرملة ، وكذلك الطاقة الميكانيكية الكامنة أصلا في الكتلة المتحركة ، علاوة على الخسارة في كفاءة تحويل الطاقة الناشئة عن هذا التبديد .

سنتناول فيما يأتي بالشرح المختصر كيفية تطبيق وسائل القرملة السابقة على بعض أنواع المحركات شائعة الاستخدام في وسائل التحريك الكهربى .

(١٠ — ٦) القرملة بالتوليد المرتجع :

يمكن تهيئة المحرك للعمل كمولد على الينبوع الذى كان يغذيه عن طريق رفع قيمة القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في ملفات المنتج ، بحيث تصبح أكبر من ضغط الينبوع (هندسة الآلات الكهربائية صفحة ٢٨٢) . ويمكن تنفيذ ذلك في حالة المحركات التى يتم التحكم في سرعتها عن طريق خفض ضغط التشغيل ، حتى يصبح اقل من القوة الدافعة الكهربائية للمحرك ، كما يحدث مع مجموعة وارد ليونارد حيث يمكن خفض ضغط المولد الذى يغذى المحرك عن طريق خفض قيمة تيار التنبيه في المولد ، كما يمكن ايضا الوصول الى نفس الغرض برفع قيمة القوة الدافعة الكهربائية للمحرك عن طريق رفع قيمة تيار التنبيه فيه . أما في حالة محركات التوازي ، أو ذات التنبيه المستقل ، التى تتغذى من ينبوع ذى ضغط ثابت ، فان الحل الوحيد يكون في رفع قيمة القوة الدافعة الكهربائية للمحرك عن طريق زيادة قيمة تيار التنبيه فيه . كذلك يمكن الحصول على نفس النتيجة اذا أمكن جعل الحمل يدفع المحرك (overhauls the motor) في نفس اتجاه دورانه (كما يحدث عند هبوط مركبة كهربائية متحدرا ، حيث تقوم مركبة الثقل بعملية الدفع) ، بحيث تتعدى سرعته حدها الذى تبلغه في حالة اللاحمل . وعندما يكون تيار التنبيه معلوما فانه يمكن حساب قيمة عزم دوران المحرك عند أية سرعة ، أو على العكس يمكن الحصول على قيمة تيار المنتج أو قيمة القوة الدافعة الكهربائية ، على حسب الاحوال ، عن طريق حل المعادلات الخاصة بدوائر المحرك (صفحة ٤٨٠ الى صفحة ٤٩٤ من كتاب

هندسة الآلات الكهربائية). بالنسبة لمحركات التوالى نجد أننا لا نستطيع جعل القوة الدافعة الكهربائية المحرك أكبر من ضغط الينبوع ، بأى من الأساليب السابقة ، لأن تيار التنبيه هو نفسه تيار الحمل ، فلا يزيد الا بزيادة الحمل ، كما أن ارتفاع قيمة السرعة لا ينشأ الا بانخفاض قيمة التيار ، وهذا ما يؤكد عليه منحني خواص المحرك . لذلك نضطر ، عند استخدام هذا النوع من القرملة مع محركات التوالى المستخدمة في الجر الكهربى ، الى فصل توصيلات المحرك ، ثم جعل تنبيهه مستقلا ، بتغذية ملفات المجال على التوازى مع المنتج من الينبوع ، مع اخذ الاحتياطات اللازمة في هذه الحال ، كما يتضح عند مراجعة القرملة في الجزء الخاص بالجر الكهربى من هذا الكتاب .

مثال محلول (١) :

A D.C. shunt motor is fed from a 220 V supply and when running at 1150 r.p.m , with full excitation , it has an induced e.m.f. of 215 volts. It is coupled to an overhauling load with a torque of 19 Kg.m. . If the armature has a resistance of 0.04 ohm, determine the lowest speed at which the motor can hold the load by regenerative braking.

يشير الدليل 1 في الحل الآتى الى القيم المختلفة للسرعة ، القوة الدافعة الكهربائية ، الخ عندما كان المحرك يدير الحمل ، ويشير الدليل 2 الى القيم المناظرة عندما أصبح الحمل هو الذى يدفع المحرك فى نفس اتجاه الدوران بسرعة تزيد عن سرعته فى حالة اللاحمل ، وذلك لكي يعمل كمولد ، ويمكن أن تتم القرملة بالتوليد المرتجع . ان أقل سرعة n_2 يمكن أن تصل إليها الآلة ، وهى تعمل كمولد ، تلك التى يصبح عندها عزم الدوران المضاد الناشئ عن تأثير رد فعل المذبح مساويا لعزم دوران الحمل ١٩ كجم متر ، الذى يدفع الآلة فى تلك اللحظة . ويتحدد عزم الدوران هذا بقيمة القوة الدافعة الكهربائية E_2 ، التى تحددها

السرعة المطلوبة n_2 ، و تيار الفرملة I_{a2} ، الذى يحدى القدرة المرتجعة الى
الينبوع ، والذى تتحدد قيمته بقيمة القوة الدافعة الكهربية أيضا . ويكون
الحل ، على هذا الأساس على النحو التالى :

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow E_2 = E_1 \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

$$T = 0.973 \frac{E_2 I_{a2}}{n_2} \rightarrow I_{a2} = \frac{T n_2}{0.973 E_2} = \frac{T n_1}{0.973 E_1} \quad (2)$$

$$E_2 = V + I_{a2} R_a \quad (3) \quad \text{الآلة تعمل كمولد :}$$

بالتعويض عن قيمتى E_2 ، I_{a2} فى المعادلة (3) من المعادلتين (1) ، (2)

$$E_1 \frac{n_2}{n_1} = V + \left(\frac{T n_1}{0.973 E_1} \right) R_a$$

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{n_1}{E_1} \left[V + \left(\frac{T n_1}{0.973 E_1} \right) R_a \right] \quad (4)$$

$$= \frac{1150}{215} \left[220 + \frac{19 \times 1150 \times 0.04}{0.973 \times 215} \right]$$

$$= 1200 \text{ r.p.m.}$$

(١١ - ٦) الفرملة ديناميكية :

يتم توصيل مقاومة على طرفى المنتج ، بدلا من الينبوع ، فى خلال فترة
الفرملة ، حيث تعمل الآلة كمولد تديره طاقة الحركة الكامنة فى الكتل الدائرة
على عمود الإدارة ، التى اكتسبتها فى خلال فترة التحريك . وتبدد الطاقة
تدريجيا مما يؤدى إلى انخفاض سرعة الآلة ، ولكننا نحاول الاحتفاظ بقيمة
ناجية للتيار المسار فى المقاومة ، الذى يعمل على تبديد الطاقة ، وذلك بخفض
قيمة المقاومة بدرجة تتناسب مع الحفض المستمر فى السرعة . ويمكن تحقيق

نفس الهدف إذا استطعنا التحكم في تيار التذيه ، وذلك بزيادة قيمته للتعويض
الخفض المستقر في السرعة .

ولكن من الجلي أن هذا يمكن أن يتم في حالي الآلات ذات التذيه التوازي
والمستقل ، بينما يتغير في حالة تذيه التوازي . وتتحدد قيمة السرعة وعزم
الدوران في هذه الحالة أيضا ، كما حدث في الحالة السابقة بمعرفة تيار المنتج
والقوة الدافعة الكهربائية ،

مثال محلول (٢) :

A 4 - pole D.C. shunt motor is used separately excited for
rheostatic braking of its connected load. Assuming that the flux
per pole remains constant at 2 megalines during braking, determine
the time for deceleration from 100 to 5 r.p.m. It is assumed
that an armature Current of 300 A will be maintained constant
during cutting but the external armature circuit resistance
gradually . The armature Winding is wave Connected and has a
total number of 258 Conductors. The total fly - wheel moment
of the drive referred to the motor shaft is 1350 Kgm² , and the
armature Winding has a resistance of 0.03 ohms

القوة الدافعة الكهربائية E المتولدة في المنتج ، عند أية سرعة n لفة في
الدقيقة ، في أثناء الفرملة عبارة عن :

$$E = \frac{2p}{2a} \phi Z \frac{n}{60} \times 10^{-8} = \frac{4}{2} \times 2 \times 10^6 \times 258$$

$$\times \frac{10^{-8}}{60} n = 0.172 n \quad (1)$$

يمكن الاحتفاظ بقيمة التيار عند ٣٠٠ أمبير ، مع انخفاض السرعة في أثناء

الفرملة ، بتقليل قيمة المقاومة الخارجية ، حتى يتم قصرها عند سرعة معينة n_{sc} ، حيث تكون قيمة القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في المنتج ، على حسب المعادلة (1) عبارة عن $0.172n_{sc}$ ، وتكون قيمة التيار محددة بـ ٣٠٠ أمبير بمقاومة ملفات المنتج فقط ، لذلك نجد أن :

$$0.172 n_{sc} = 300 \times 0.03 \rightarrow n_{sc} = 52.3 \text{ r.p.m} \quad (2)$$

إن عزم الدوران T ، بدلالة تيار المنتج I_a ، بالشروط المعطاة ، للآلة عبارة عن :

$$\begin{aligned} T &= 0.973 \frac{E I_a}{n} = 0.973 \times 0.172 I_a \\ &= 0.1673 I_a \quad \text{Kg.m.} \quad (3) \end{aligned}$$

ونظرا لاحتفاظنا بقيمة I_a ثابتة تصبح قيمة عزم الدوران ثابتة في خلال هذه الفترة من الفرملة ، وهذا يعني أن عجلة التقصير الزاوية $\frac{d\omega}{dt}$ تكون ذات قيمة ثابتة في هذه الفترة أيضا ، مما يمكننا من استعمال معادلة على نمط المعادلة (٢٥ - ٦) للحصول على الزمن t_1 الذي يمضي حتى تنخفض السرعة من ١٠٠ إلى ٥٢.٣ لفة في الدقيقة على النحو التالي :

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{(Gd^2)_d \times (n_0 - n_1)}{375 T} = \frac{1350 \times (100 - 52.3)}{375 \times 0.1673 \times 300} \\ &= 3.425 \text{ sec} \end{aligned}$$

عندما تنخفض السرعة عن ٥٢.٣ لفة في الدقيقة ، حيث تكون المقاومة الخارجية قد قصرت ، ولم يبق في دائرة المنتج سوى مقاومة ملفات ، التي تظل ثابتة القيمة ، تأخذ قيمة القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في ملفات المنتج في الانخفاض ، متناسبة مع قيمة السرعة المتناقصة ، وترتبط بين القيمتين المعادلة رقم (١) . وتنقص قيمة التيار أيضا متناسبة مع السرعة حيث :

$$I_{asc} = \frac{E}{R_a} = \frac{0.172 n}{0.03} = 5.73 n \text{ Amps} \quad (4)$$

وتصبح قيمة عزم الدوران T_{sc} في هذه المرحلة ، بالتعويض في المعادلة (3)

$$T_{sc} = 0.1673 \times 5.73 n = 0.96 n \text{ Kg.m.} \quad (5)$$

بعد أن حصلنا على عزم الدوران كدالة للسرعة n نستطيع حساب زمن الفرملة t_2 ابتداء من السرعة ٥٢٣ إلى السرعة ٥ لفئة في الدقيقة ، باستخدام المعادلة (٢٦ - ٢٧) ، فنجد أن :

$$\begin{aligned} t_2 &= \int_{n=52.3}^{n=5} \frac{1350 \times \frac{dn}{n}}{0.96 \times 375} \\ &= - \frac{1350}{0.96 \times 375} \left[\log_e (5) - \log_e (52.3) \right] \\ &= \frac{1350 \times 2.303}{0.96 \times 375} \left[\log_{10} (10.46) \right] = 8.7 \text{ secs.} \end{aligned}$$

يلاحظ أننا استخدمنا $-dn$ بدلا من dn في المعادلة (٢٦ - ٢٧) ، التي استنبطت على أساس التعجيل ، مما يستوجب تغيير الإشارة في حالة الفرملة ، أي التقصير . كما يلاحظ أن زمن الفرملة في المرحلة الأولى ، عند الاحتفاظ بقيمة التيار I_a ثابتة ، يقل كثيرا عن زمن الفرملة في المرحلة الثانية ، عندما كان التيار يتناقص متناسبا مع السرعة ، وهذا ناشئ بطبيعة الحال عن زيادة قيمة عزم الدوران الفرمل ، الثابت في الحالة الأولى ، كثيرا عن متوسط قيمته المتناقص في الحالة الثانية . هذا وتجدر الإشارة إلى أن تغيير المقاومة في الحالة الأولى ، للحصول على زمن الفرملة الصغير ، يحتاج إلى مجموعة تحكم بتغذية رجعية (feed - back control system) ، وهو أمر يعتبر انجازه غاية في الصعوبة من الناحية التكنولوجية البحتة ، كما أنه غير مستساغ من

الناحية الاقتصادية ، إذا قورنت المزايا التي يوفرها بالنفقات الباهظة التي يتكلفتها .

$$t_1 + t_2 = 3.425 + 8.7 = 12.125 \text{secs.} \quad \text{: زمن الفرملة الكلي}$$

يضاف إلى ذلك بطبيعة الحال الزمن الذي يمضي من لحظة وصول المحرك إلى سرعة ٥ لفة في الدقيقة حتى يقف تماما ، وهو زمن صغير ، حيث تستخدم فرملة ميكانيكية عادة في تلك المرحلة . هذا ويلاحظ أنه لا يمكن حساب هذا الزمن باستخدام المعادلة (٢٦ - ٦) ، على أساس جعل وسيلة الفرملة الكهربائية تستمر في الإيقاف حتى تصبح $n=0$ ، لأن قيمة التكامل تصبح في هذه الحالة مالا نهاية .

(١٢ - ٦) الفرملة بالتيار المعكوس أو عن طريق التبديل :

عند تبديل توصيل (plugging) طرفي المحرك ، أثناء دورانه ، إلى الينبوع الكهربى ، تصبح القوة الدافعة الكهربائية مضافة على التوالى مع ضغط الينبوع ، بعد أن كانت تضاده . وهذا يعنى أن ضعف ضغط الينبوع تقريبا (القوة الدافعة الكهربائية تساوى أقل قليلا من ضغط الينبوع) أصبح عاملا على مقاومة دائرة المنتج الصغير لتمرير التيار فيها ، مما قد يؤدي إلى إتلاف ملفات المنتج ، ما لم تتخذ الاحتياطات المناسبة ، بتوصيل مقاومة مناسبة على التوالى في الدائرة ، كما يحدث عند البدء . وإلى جانب جزء الحرارة التي تبددها هذه المقاومة ، ويكون مصدره الينبوع ، يوجد جزء آخر ينشأ نتيجة لتحويل طاقة الحركة الكامنة في الكتلة الدائرة على عمود إدارة المحرك ، عندما يعمل كمولد نتيجة لعكس اتجاه مرور التيار فيه . وعلى هذا النحو يتولد عزم الدوران العرمل في المحرك . ويلاحظ أننا نحتاج ، في هذا الشأن ، إلى استخدام مقاومة تبلغ قيمتها ضعف قيمة مقاومة البدء المطلوبة ، بالنسبة لمحركات التيار المستمر ، علاوة على الخسارة والمتاعب المادية الناشئة عن كميات الحرارة التي تبددها هذه المقاومة من الينبوع ،

بدون مبرر. لذلك قلنا يستخدم هذا النوع من وسائل الفرملة مع محركات التيار المستمر.

مثال محلول :

The following table gives the data for drawing the magnetisation Curve of a D.C. shunt motor, which has an armature resistance of 0.046 ohm and field winding resistance of 12.6 ohms.

| | | | | | | | | |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|
| Field Current A | 2.5 | 5 | 7.5 | 10 | 12.5 | 15 | 17.5 | 20 |
| E.M.F. at 1200 r.p.m | 50 | 100 | 147 | 180 | 205 | 220 | 232 | 242 |

The motor is supplied from 220 V supply and has a fly-wheel moment for the armature and load together of 380 Kg.m². If reverse-current braking is used, and the armature current is not to exceed 210 A While braking , find the value of the suitable resistance to be used and the time taken for braking the motor speed from 1000 to 500 r.p.m. Find also the values of the energy supplied to the resistance from kinetic energy and from the supply.

$$I_f = \frac{220}{12.6} = 17.5 \text{ Amps} \quad \text{تيار التنبيه في المجال :}$$

من المنحنى نجد أن القوة الدافعة الكهربية عند 200 لفة / الدقيقة :

$$E_1 = 232 \text{ Volts}$$

القوة الدافعة الكهربية عند 1000 لفة / الدقيقة مع نفس تيار التنبيه :

$$E_2 = 232 \times \frac{1000}{1200} = 193.3 \text{ V}$$

$$V_t = 220 + 193.3 = 413.3 \text{ V} \quad \text{الضغط الكلي في الدائرة}$$

حتى لا يتعدى التيار 210 A المقاومة الكلية في الدائرة :

$$R_t = \frac{413.3}{210} = 1.966 \text{ ohm}$$

المقاومة المناسبة اللازم اضافتها :

$$R_{ad} = 1.966 - 0.046 = 1.92 \text{ ohm}$$

تكون قيمة القوة الدافعة الكهربائية E_b في أثناء الفرملة عند أية سرعة n_b بين ٥٠٠ و ١٠٠٠ لفة / الدقيقة :

$$E_b = 232 \times \frac{n_b}{1200} = 0.1933 n_b \text{ V}$$

وتكون قيمة التيار I_b في الدائرة بناء على ذلك :

$$I_b = \frac{220 + E_b}{R_t} = \frac{220 + 0.1933 n_b}{1.966}$$

وهو يمر في المحرك في عكس اتجاهه أثناء التحريك :

$$I_b = (111.7 + 0.0984 n_b) \text{ A}$$

ويتولد عزم دوران فرملي T_b بسبب اتجاه التيار المعكوس تكون قيمته :

$$\Gamma_b \text{ (Kg.m.)} = 0.973 \frac{E_b I_b}{n_b} = 0.973 \times \frac{232}{1200} (111.7 + 0.0984 n_b)$$

$$T_b = (21 + 0.0185 n_b) \text{ Kg.m.}$$

باستخدام المعادلة (٢٦ — ٢٧) نحصل على زمن الفرملة من السرعة ١٠٠٠ إلى ٥٠٠ لفة / الدقيقة ، حيث :

$$t_{b2} = \int_{n_{b1}=1000}^{n_{b2}=500} \frac{380 \times -dn_b}{375 (21 + 0.0185 n_b)}$$

$$t_{br} = \frac{380 \times 2.303}{375 \times 0.0185} \log_{10} \left[\frac{21 + 0.0185 \times 1000}{21 + 0.0185 \times 500} \right]$$

$$= 14.7 \text{ secs}$$

للحصول على مقدار الطاقة التي يعطيها المحرك من طاقة حركته ، في أثناء
الفرملة من ١٠٠٠ إلى ٥٠٠ لفة في الدقيقة ، نلجأ إلى استخدام العلاقة بين
مقدار القدرة P_m للمحرك وعزم دورانه الفرملي T_b ، عند أية لحظة تتحدد
بالسرعة ω في خلال هذه الفترة ، وذلك على النحو التالي :

عزم الدوان الفرملي :

$$T_b = \frac{(GD^2)_d}{4g} \times \frac{-d\omega}{dt} = \frac{P_m}{\omega}$$

∴ الطاقة المعطاة بين سرعتين أثناء الفرملة :

$$\therefore \int_0^{t_{br}} P_m dt = \int_{\omega_{b1}}^{\omega_2} \frac{(GD^2)_d}{4g} \omega d\omega$$

$$\omega_{b1} = \frac{2\pi \times 1000}{60} = 104.6 \text{ rad/sec}$$

$$\omega_{b2} = \frac{2\pi \times 500}{60} = 52.3 \text{ rad/sec}$$

ويكون مقدار الطاقة المطلوبة عبارة عن :

$$= \int_{52.3}^{104.6} \frac{380}{4 \times 9.81} \omega d\omega = \frac{380}{4 \times 2 \times 9.81} \left[(104.6)^2 - (52.3)^2 \right]$$

$$= 4.84 \times 10^4 [1.095 - 0.273]$$

$$= 3.98 \times 10^4 \text{ Kg.m.} = 39.15 \times 10^4 \text{ Joules}$$

$$= 391.5 \text{ KW.sec}$$

إن كمية الطاقة التي يبديها الينبوع في المقاومة بخلاف طاقة الحركة السابقة
عبارة عن :

$$\int_0^{t_{br}} 220 \times I_b dt = \int_0^{t_{br}} 220 (111.7 + 0.0984 n_b) dt$$

وللحصول على قيمة التكامل لا بد من إيجاد العلاقة بين n_b أو $\frac{\omega_b}{2\pi}$ والزمن t . لذلك نلجأ إلى افتراض أن عزم الدوران الفرملي T_b ثابت القيمة تقريبا في خلال هبوط السرعة من ١٠٠٠ إلى ٥٠٠ لفة في الدقيقة ، والحقيقة أن علاقته مع n_b تبين أن قيمته تهبط من ٣٩ كجم متر عند ١٠٠٠ لفة في الدقيقة إلى ٣٠ كيلو جرام . متر عند ٥٠٠ لفة في الدقيقة . بذلك نستطيع أن نفترض أن السرعة n_b تتغير خطيا في خلال فترة الفرملة t_{br} (العجلة منتظمة على أساس ثبات قيمة عزم الدوران) بحيث تصبح :

$$\begin{aligned} n_b &= n_{b2} + \frac{n_{b1} - n_{b2}}{t_{br}} (t_{br} - t) \\ &= 500 + \frac{500 \times 60}{14.7} \left(\frac{14.7}{60} - \frac{t}{60} \right) \\ &= 500 + 500 - \frac{500}{14.7} t = 1000 - \frac{500}{14.7} t \\ &= 1000 - 30.4t \end{aligned}$$

وهذا يعني أن عجلة التقصير الزاوية ، التي اعتبرناها ثابتة ، هي
 $\frac{2\pi \times 500}{14.7} = 68.2 \pi$ زاوية نصف قطرية في الدقيقة لكل ثانية .

وتكون كمية الطاقة المطلوبة هي

$$\int_{t_{br}=0}^{t_{br}=14.7} 220 \times 111.7 dt + \int_{t_{br}=0}^{t_{br}=14.7} 98.4 dt - \int_{t_{br}=0}^{t_{br}=14.7} 2.99 t dt \quad \text{Joules}$$

$$220 \times 111.7 \times 14.7 + 98.4 \times 14.7 - \frac{1}{2} \times 2.99 \times (14.7)^2 \quad \text{Joules}$$

$$36.2124 \times 10^4 - 0.323 \times 10^4 \quad \text{Joules}$$

$$36.2124 \times 10^4 \quad \text{Joules} \quad 36.2124 \times 10^4 \quad \text{KW.sec}$$

إن كمية الطاقة التي تبدد في المقاومة الكلية لدائرة المنتج ، التي تبلغ ١٩٩٦ أوم هي مجموع كيتي الطاقة اللتين حصلنا عليها فيما سبق أي

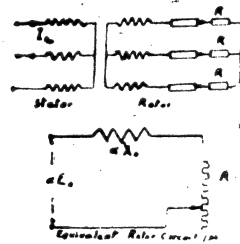
$$(39.15 + 36.2124) \times 10^4 = 75.3624 \times 10^4 \quad \text{Joules}$$

(١٣ -) فرملة المحركات التأثيرية باستخدام التيار المستمر :

عند فصل المحرك التأثيري من اليدوع فسوف يمر بعض الوقت حتى يصل العضو الدائر إلى حالة السكون ، حيث تكون طاقة الحركة المخزنة في الكتل الدائرة قد استنفدت في مفقودات الاحتكاك ولقصر هذا الوقت ، للدواعي الإقتصادية ، أو دواعي الأمن ، يمكن تغذية العضو الثابت بين طرفين من أطرافه الثلاثة بتيار مستمر ، وتوصيل الحلقات الارلاقية إلى مقاومات خارجية ، قد تكون هي نفسها مقاومة البدء ، أو الاكتفاء بمقاومة ملفقات العضو الدائر وهو مقصور . وتعزى سرعة وصول العضو الدائر إلى حالة السكون ، على هذا النحو ، إلى زيادة استهلاك طاقة الحركة المخزنة في الكتل الدائرة في مفقودات الحديد الناشئة عن وجود المجال المغناطيسي ، الذي يصنعه التيار المستمر ، إلى جانب مفقودات النحاس في مقاومات العضو الدائر ، بسبب التيارات التأثيرية الناتجة عن حركة الملفات في ذلك

المجال . والحقيقة أنه يمكن اعتبار المحرك ، في خلال فترة الايقاف ، مولدا تيار متردد ذا سرعة متغيرة (من n إلى الصفر) ، يأخذ القدرة الميكانيكية من طاقة الحركة الكامنة في الكتل الدائرة على عمود الإدارة . ويكون تيار التنبيه في هذه الحالة ، هو التيار المستمر في ملفات العضو الثابت (قائمة بذاتها ، أو مع المقاومات الموصلة إليها عن طريق الحلقات الانزلاقية) ، كما أن ملفات العضو الدائر تعتبر دائرة الحمل الذي تستهلك فيه الطاقة الكهربائية على شكل مفقودات حرارية .

ويمكن توصيل الحلقات الانزلاقية إلى مقاومة ثلاثية المراحل ، كما يمكن أن توصل مقاومة مفردة بين حلقتي ، وتترك الثالثة مفتوحة بدون توصيل . ففي الحالة الأولى نحصل على تيارات ثلاثية المراحل في دائرة العضو الدائر خلال فترة الفرملة ، وفي الحالة الثانية نحصل على تيارات احادية المرحلة ، وفي كلتا الحالتين يعمل المحرك كمولد تيار متردد ، ثلاثي المراحل أو احادي المرحلة ، على حسب الأحوال .



(شكل ٩ - ٦)

يبين شكل (٩ - ٦) دائرة التيار المتردد المكافئة لكل مرحلة في العضو الدائر . سوف نفترض أن E_0 هي القوة الدافعة الكهربائية التي تتولد في هذه المرحلة عند سرعة التزامن n_0 بفعل المجال المغناطيسي الناشئ عن تيار التنبيه المستمر في العضو الثابت ، وأن X_0 هي ممانعة التزامن لنفس المرحلة عند نفس

السرعة . في خلال فترة الفرملة تتغير القوة الدافعة الكهربائية إلى E والممانعة إلى X على حسب السرعة n . فإذا كانت $\alpha = \frac{n}{n_0}$ ، نجد أن :

$$E = \alpha E_0 , \quad X = \alpha X_0 \quad (٦-٣٣)$$

فإذا كانت R هي المقاومة المرحلية في دائره العضو الدائر و I التيار المرحلي عند السرعة n ، نجد أن :

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{\alpha E_0}{\sqrt{R^2 + \alpha^2 X_0^2}} \quad (٦-٣٤)$$

وتكون القدرة P المستهلكة في دائرة العضو الدائر، على حساب طاقة الحركة الكامنة في الكتل الدائرة ، ومن ثم عزم الدوران T ، عبارة عن :

$$P = 3 I^2 R = \frac{3 E_0^2 \alpha^2 R}{R^2 + \alpha^2 X_0^2} \text{ Watts} \quad (٦-٣٥)$$

$$T = 0.973 \frac{P}{n} = \frac{2.919 E_0^2}{n_0} \times \frac{\alpha R}{R^2 + \alpha^2 X_0^2} \text{ Kg. m.} \quad (٦-٣٦)$$

وبذلك يكون عزم الدوران متناسبا مع α ، أى مع السرعة ، ولكي نحصل على النهاية العظمى لعزم الدوران T_m ، في خلال فترة الفرملة ، نفاضل بالنسبة لـ α ، ونساوي بالصفر ، على النحو التالي :

$$T = C \frac{\alpha \frac{R}{X_0}}{R^2/X_0^2 + \alpha^2} , \quad C = \frac{2.919 E_0^2}{n_0 X_0} \quad (٦-٣٧)$$

$$\frac{dT}{d\alpha} = 0 , \quad K \left\{ \left(\frac{R^2}{X_0^2} + \alpha^2 \right) \frac{R}{X_0} - 2 \alpha^2 \frac{R}{X_0} \right\} = 0$$

$$\therefore \alpha_m = \pm \frac{R}{X_0} \quad (\text{الإشارة السالبة لاتجاه الدوران المضاد})$$

$$(٦-٣٨)$$

حيث α_m هي القيمة عند النهاية العظمى لعزم الدوران T_m .

$$T = 2 T_m \frac{\alpha \alpha_m}{\alpha^2 + \alpha_m^2} \text{ Kg.m.} \quad (٦-٣٩)$$

$$T_m = \frac{2.919 E_0^2}{2 n_0 X_0} = \frac{1}{2} C \text{ Kg.m.}$$

يتضح من المعادلة (٦-٣٩) أن منحنى عزم الدوران T مع السرعة n (أو α_{n_0})، يماثل عزم الدوران مع الانزلاق للمحرك، المعطى في شكل (١-٤)، وذلك على أساس التماثل القائم بين المعادلتين (١-٢٠) و (٦-٣٩). ويكون عزم دوران المولد في هذه الحالة عبارة عن عزم الدوران الفرملي للمحرك T_b ، في خلال فترة الفرملة. فإذا كانت J هي عزم القصور الذاتي للكتل الدائرة على عمود إدارة المحرك في هذه الفترة، وكانت ω هي السرعة الزاوية بعد أية لحظة t من بداية الفرملة، نجد أن

$$T = T_b = J \frac{d\omega}{dt}, \quad \omega = \alpha \omega_0, \quad \alpha = \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{n}{n_0} \quad (٦-٤٠)$$

إذا كانت ψ هي زاوية دوران العضو الدائر في خلال فترة الفرملة، حتى يصل الى حالة السكون، نجد أن:

$$d\psi = \omega dt = \frac{J}{T} \omega d\omega, \quad dt = \frac{J}{T} d\omega \quad (٦-٤١)$$

ويكون زمن الفرملة t_b ، بناء على ذلك، عبارة عن:

$$t_b = \int_0^{t_b} dt = \int_{\omega_0}^0 \frac{J}{\omega} d\omega = \int_{\omega_0}^0 \frac{J}{2 T_m \omega_m} \times \frac{\alpha_m^2 + \alpha^2}{\alpha} d\omega$$

$$= \int_{\omega_0}^0 \frac{J}{2 T_m \omega_m^2} \times \frac{\omega_m^2 + \omega^2}{\omega} d\omega \quad (٦-٤٢)$$

$$\alpha_m = \frac{\omega_m}{\omega_0}, \quad d\omega = \omega_0 d\alpha \quad (٦-٤٣)$$

بالتعويض من (٦-٣٩) و (٦-٤٣) في (٦-٤١)، نجد أن :

$$d\Psi = \frac{J \omega_0^2}{2 T_m \alpha_m} \times \frac{\alpha_m^2 + \alpha^2}{\alpha} \alpha d\alpha$$

$$\Psi = \int_{\alpha=1}^{\alpha=0} d\Psi = \left[\frac{J \omega_0^2}{2 T_m \alpha_m} \left(\alpha \alpha_m^2 + \frac{\alpha^3}{3} \right) \right]_1^0$$

$$= - \frac{J \omega_0^2}{2 T_m} \left(\alpha_m + \frac{1}{3 \alpha_m} \right) \quad (٦-٤٤)$$

تتوقف قيمة T_m على قيمة تيار التنبيه بطبيعة الحال ، وبثبوت قيمة تيار التنبيه تختلف قيمة Ψ في المعادلة (٦-٤٤) باختلاف قيمة α_m ، وبالتالي قيمة المقاومة R في دائرة العضو الدائر . ولكي نحصل على قيمة النهاية الصغرى للزاوية Ψ نقاضل المعادلة (٦-٤٤) ، ونساوى بالصفر ، حيث نجد أن :

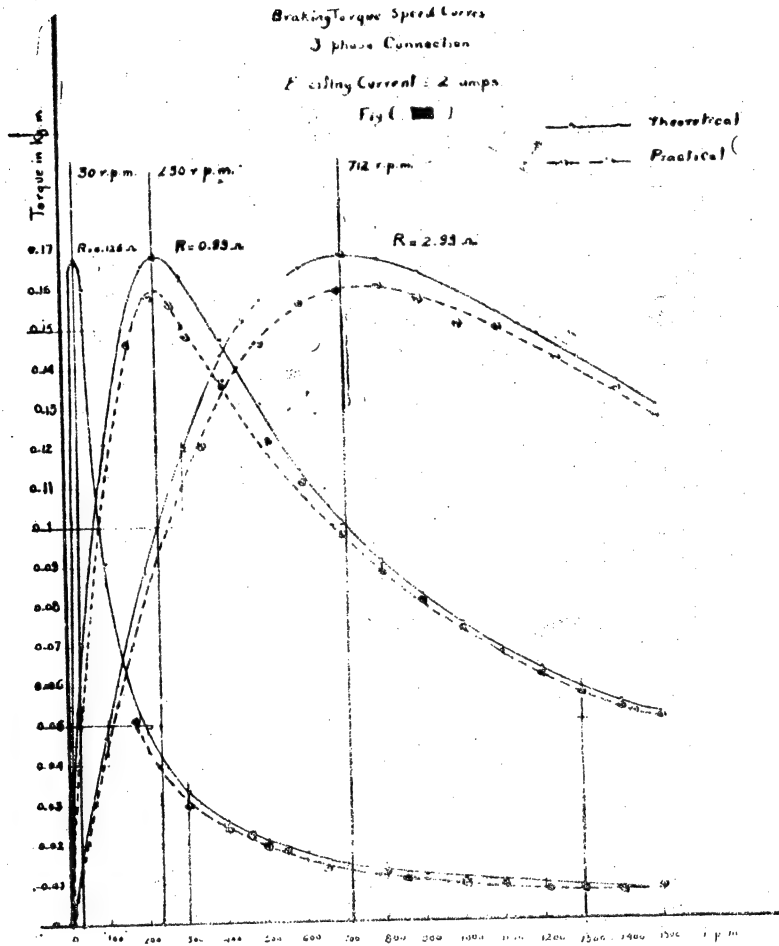
$$\frac{d\Psi}{d \alpha_m} = 0, \quad \alpha_m^2 = \frac{1}{3}, \quad \alpha_m = \sqrt{\frac{1}{3}} = .578 \quad (٦-٤٥)$$

وهذا يعنى أن الحصول على أقل قيمة ممكنة للزاوية Ψ ، مع ثبوت قيمة

تيسار التنبيه ، تستلزم أن تكون قيمة المقاومة المرحلية R في دائرة العضو
الدائر (داخلية وخارجية) عبارة عن :

$$R = 0.578 X_0$$

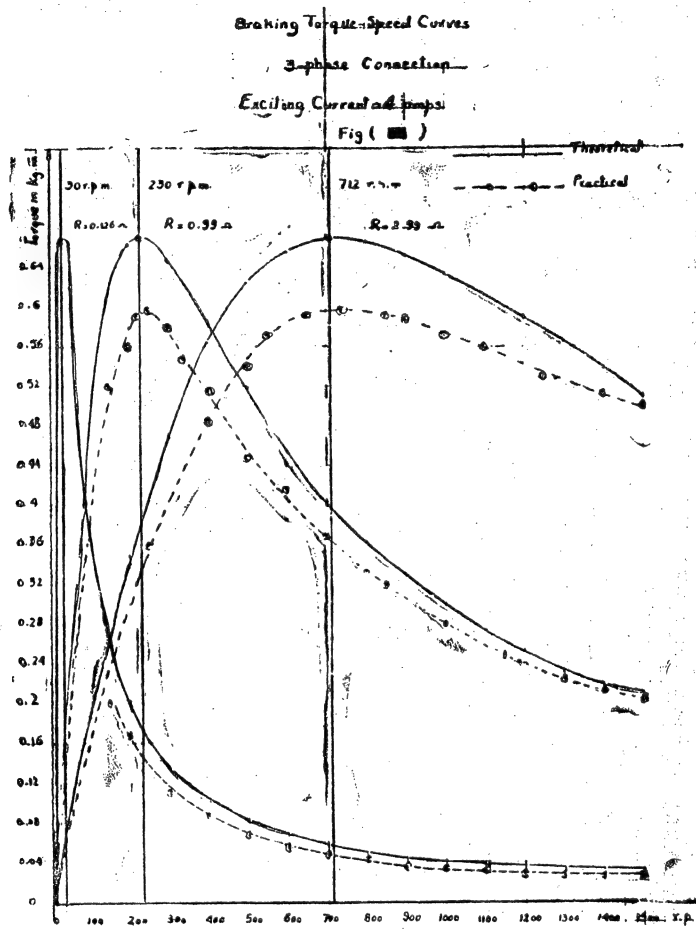
(٦-٤٦)



شكل (١٠-٦)

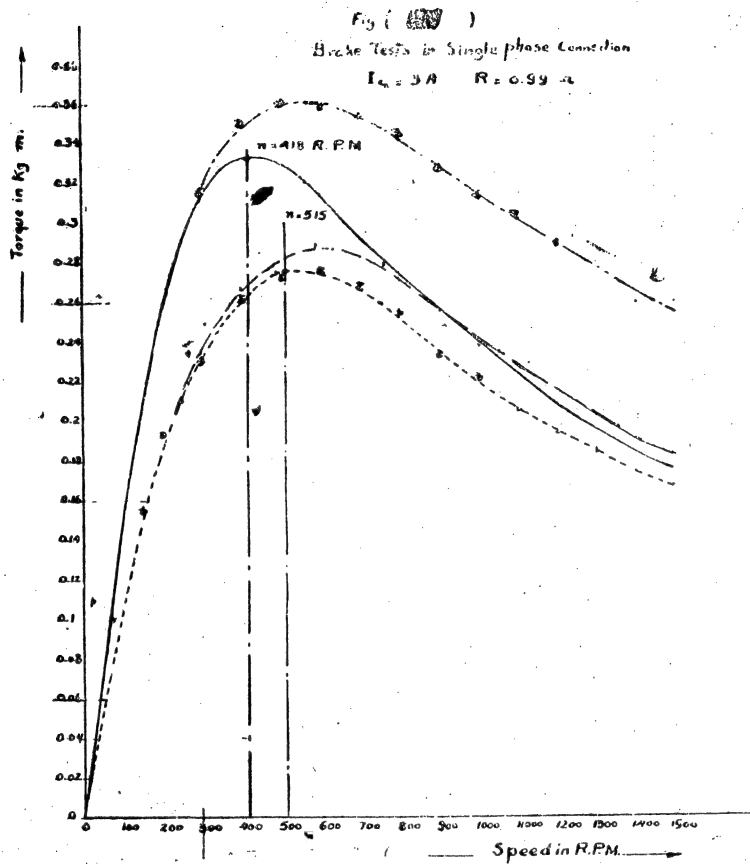
يبين شكل (١٠-٦) منحنيات عزم الدوران الفرملية مع السرعة في خلال
فترة الفرملة ، على أساس المعادلة (٦-٣٩) [نظريا وعمليا على أحد المحركات] ،

عند تيار التنبيه ٢ أمبير، ومقاومات مختلفة، كما يبين شكل (١١ - ٦) المنحنيات المناظرة عندما تكون قيمة تيار التنبيه ٤ أمبير .



شكل (١١ - ٦)

ويبين شكل (١٢ - ٦) منحنيات الفرملة في حالة استخدام دائرة احادية المرحلة في العضو الدائر .

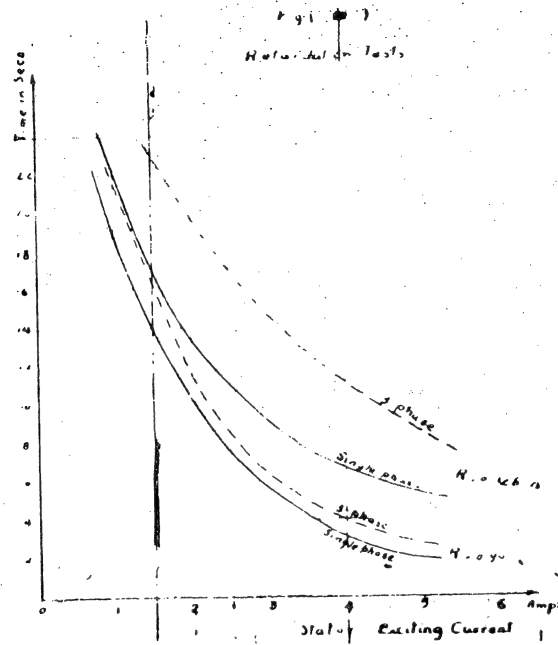


شكل (١٢-٦)

هذا ويتوقف زمن الفرملة بطبيعة الحال على كل من قيمة المقاومة المرحلية في دائرة العضو الدائر R ، وقيمة تيار التنبيه ، ونوع التوصيل في العضو الدائر ، كما هو مبين في شكل (١٣-٦)

ويمكن استخدام المعادلة (٢٨-٦) لحساب زمن الفرملة ، مع التعويض

عن T_{br} فيها بـ T الدوران ، المعطى بالمعادلة (٣٦-٦) ، ووضع $\alpha = \frac{n}{n_0}$

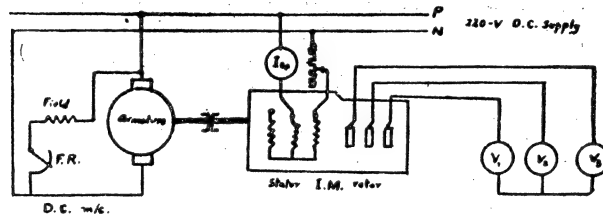


(شكل ١٣ - ٦)

في هذه المعادلة ، باعتبار أن n_0 هي نفسها n_m . وسوف تواجهنا في هذه الحالة مشكلة عدم وجود قيمة محددة للتكامل عند السرعة صفر ، حيث تصبح هذه القيمة مالا نهاية ، وتتغلب على هذه الصعوبة بالحل البياني ، كما سيرد شرحه في الباب التالي .

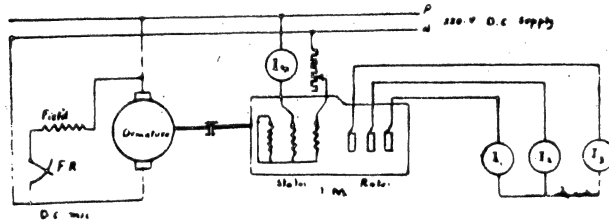
يتبين من المنحنيات المعطاة في شكل (١٣ - ٦) أن زمن الفرملة يقل مع توصيل العضو الدائر أحادي المرحلة ، ذلك لأن المساحة المحصورة تحت منحنى عزم الدوران الفرملي تكون في حالة توصيل العضو الدائر احادي المرحلة أكبر منها في حالة توصيل العضو الدائر ثلاثي المراحل ، وهذه المساحة تتناسب مع كمية الطاقة المبذولة على حساب كمية الطاقة المخزنة في الكتل الدائرة .

بالنسبة لقيمة كل من E_0 ، X_0 في المعادلات السابقة ، فإنه يمكن الحصول عليهما بإجراء اختبار اللاحمل والدائرة المقصورة للمحرك ، وهو يعمل كمولد بتيار التنبيه المحدد ، عند السرعة n_0 ، وذلك بنفس الطريقة التي اتبعناها مع الآلات المتزامنة . شكل (١٤ - ٦) يبين كيفية توصيل المحرك ، الذي يدار عند السرعة n_0 بآلة تيار مستمر ، وذلك للحصول على منحنى الدائرة المفتوحة .



(شكل ١٤ - ٦)

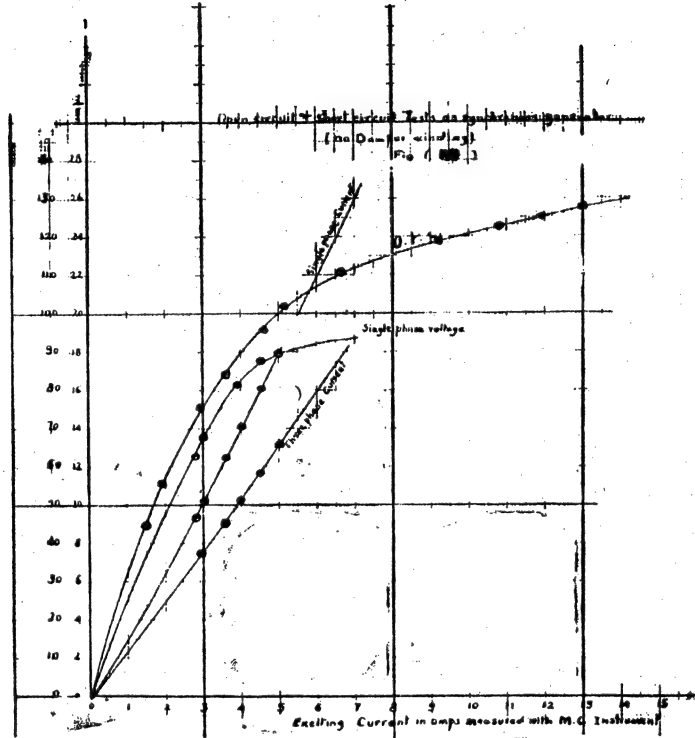
يبين شكل (١٥ - ٦) كيفية التوصيل للحصول على منحنى دائرة القصر ، وذلك عندما يدار المحرك بالسرعة n_0 .



شكل (١٥ - ٦)

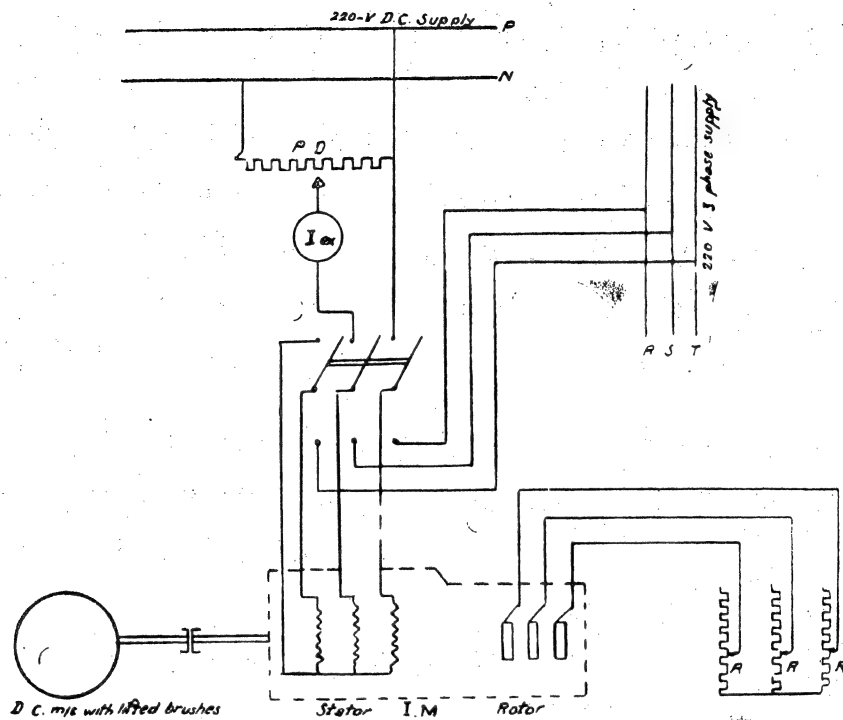
يبين شكل (١٦ - ٦) نتائج اختبار الدائرة المفتوحة ودائرة القصر على المحرك المبين منحنيات عزم الدوران القرملي له في شكل (١٠ - ٦) و (١١ - ٦) ، وذلك عند سرعة التزامن الخاصة به ، وهي ١٥٠٠ لفة في الدقيقة . ويمكن تحديد E_0 عند تيار التنبيه المستعمل من منحنى الدائرة المفتوحة ، كما أن قيمة

X_0 المناظرة هي عبارة عن خارج قسمة E_0 التي حصلنا عليها مقسومة على تيار القصر عند نفس تيار التنبيه على منحنى دائرة القصر . وهذه هي نفس الطريقة التي اتبعناها للحصول على قيمة معاوقة التزامن بالنسبة للإكالات التزامنة .



(شكل ١٦ - ٦)

يبين شكل (١٧ - ٦) كيف يتم توصيل المحرك خلال فترة الفرملة ، بعد فصله من الينبوع .



CONNECTION DIAGRAM FOR RETARDATION TESTS
Fig. ()

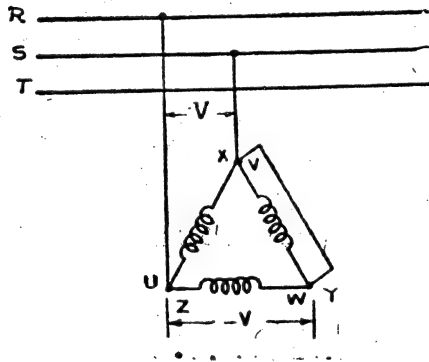
(شكل ١٧-٦)

(١٤-٦) فرملة المحركات التأثيرية باستخدام التوصيلات غير المتماثلة لل ملفات العضو الثابت مع الينبوع ، وتوصيل مقاومات في دائرة العضو الدائر .

يتولد عزم دوران فرملى ، وهو عزم الدوران الناشئ عن المجال المغناطيسى الخلفى ، عندما تكون ملفات العضو الثابت للمحرك التأثيرى موصلة بضرورة غير متماثلة مع الينبوع . وهذا هو نفسه عزم دوران مجموعة ضغوط التعاقب المرحلى السالب ، كما سبق شرحه عند الحديث عن التوصيلات غير المتماثلة فى المحركات التأثيرية .

ولكى يمكن لعزم الدوران الفرملى المذكور أن يهبط بسرعة المحرك حتى حالة السكون ، يجب أن يكون أكبر من عزم الدوران الناشئ عن المجال المغناطيسى الأمامى ، وهو الخاص بمجموعة ضغوط التعاقب المرحلى الموجب ، وذلك بعد فصل المحرك من الينبوع ، وإعادة توصيله بصورة غير متماثلة ، تمهيداً لفرملته . كما يجب أن يتلاشى الفرق بين عزمى الدوران الفرملى والامامى ، عندما يصل المحرك إلى حالة السكون ، حتى لا يدور المحرك فى الاتجاه المضاد .

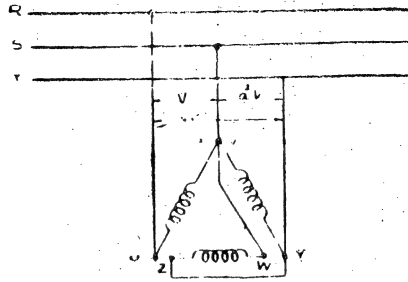
يبين شكل (٦-١٨) توصيلة تقليدية من هذا النوع لفرملة المحرك ، وهى خاصة بشركة AEG ، ويطلق عليها اسم توصيلة جوردان كريس .
Jordan-Krebs connection



(شكل ٦-١٨)

كذلك يبين شكل (٦-١٩) توصيلة أخرى تستخدم لنفس الغرض ، وهى عبارة عن توصيلة احادية المرحلة .

هذا ويمكن عن طريق إضافة مقاومات فى دائرة العضو الدائر العمل على تغيير أشكال منحنيات عزم الدوران لتحقيق الهدف المنشود .



شكل (١٩-٦)

وبالنسبة لشرط تلاشي الفرق بين عزمي الدوران الفرمل والامامي عند $S = 1$ ، نجد أنه يتحقق تلقائياً عند استخدام التوصيلتين المبيتين في شكل (١٨-٦) و (١٩-٦)، وذلك لأن ضغط مجموعة التعاقب المرحلي الموجب V_p يساوي ضغط مجموعة التعاقب المرحلي السالب V_n في كلتا الحالتين، مما يعني تساوي عزمي دوران المجموعتين عند $S = 1$.

مثال محلول :

1) An electric drive for crane work is tested with empty hook in two ways. First a retardation test is made and the following readings are recorded:

| | | | | | | |
|-------------------------------|------|------|-----|-----|-----|-----|
| time (seconds) | 0 | 2 | 4 | 8 | 12 | 18 |
| speed of motor shaft (r.p.m.) | 1200 | 1000 | 840 | 600 | 410 | 200 |

Second the input to the motor is measured as 14 KW at the no load speed of 985 r.p.m. The motor is 6 pole 3-phase induction and has the following efficiency curve.

| | | | | | |
|-------------------------------------|-----|------|------|------|------|
| Total mechanical power output (KW): | 7 | 10 | 14 | 22 | 30 |
| efficiency | 0.5 | 0.66 | 0.81 | 0.94 | 0.93 |

When the hook carries a weight of 50 tons, moving steadily at

۳۳۱

a speed of 90 m/min the motor speed is 970 r.p.m. The motor is rated at 32 KW, has a ratio rotor phase resistance to standstill reactance of 0.15 and a short-circuit current 4 times the full load current.

Find the starting time of the drive, and the distance moved by the load before attaining the steady speed.

$$S = \frac{1000 - 970}{1000} = 0.03, \quad \alpha = 0.15$$

$$T_{fl} = \frac{973 \times 32}{970} = 32.15 \text{ Kg.m.}$$

$$T_{max} = 32.15 \frac{9 \times 10^{-4} + 225 \times 10^{-4}}{90 \times 10^{-4}} = 83.6 \text{ Kg.m.}$$

$$T_s = (4)^2 \times 0.03 \times 32.15 = 15.36 \text{ Kg.m.}$$

$$T_{st} = \frac{T_{max} + T_s}{2} = \frac{83.2 + 15.36}{2} = 49.28 \text{ Kg.m.}$$

$$V_{max} = \frac{90}{60} = 1.5 \text{ m/sec}$$

$$(GD^2)_1 = 365 \frac{50000 \times (1.5)^2}{(970)^2} = 43.8 \text{ Kg.m.}^2$$

$$\begin{aligned} (GD^2)_m &= \frac{365 \eta P_0}{n_{mo} \frac{dn_{mo}}{dt}} = 365 \frac{0.81 \times 14 \times 10^3}{985 \times \frac{985}{11.6}} \\ &= 49.4 \text{ Kg.m}^2 \end{aligned}$$

$$(GD^2)_d = 1.2 \times 49.4 + 43.8 = 103.1 \text{ Kg.m.}^2$$

$$t_{st} = \frac{103.1 \times 970}{375 (49.28 - 32.15)} = 15.45 \text{ sees}$$

$$h = \frac{1.5}{2} \times 15.45 = 11.6 \text{ m}$$

مثال محلول :

2) A 16.4 HP, 220 V, 4-poles, 50 Hz, 3-phase, delta connected squirrel cage induction motor, develops a maximum torque of 2.25 full load torque at a slip of 0.15, when operated at rated voltage and frequency. The motor has a short circuit current which is five times the full load current, and is started by a star delta switch. If the fly wheel moment of the rotor with connected load referred to the motor shaft is 20 kg.m², find the per unit of full load torque against which the motor could be started, so that the starting time might not exceed 14 seconds.

$$\frac{T_{\max}}{T_{fl}} = 2.25 = \frac{s_{fl}^2 + (0.15)^2}{2 \times s_{fl} \times 0.15}, (\alpha = 0.15)$$

$$\therefore s_{fl}^2 - 0.6755 + 0.0225 = 0$$

$$s_{fl} = \frac{0.675 \pm \sqrt{0.455 - 0.090}}{2}$$

$$s_{fl} = 0.035, n = 1500 \times 0.965 = 1446 \text{ r.p.m.}$$

$$T_{fl} = 973 \times \frac{(16.4 \times 0.746)}{1446} = 8.22 \text{ Kg.m.}$$

$$T_s = \frac{1}{3} \times (5)^2 \times 0.035 T_{fl} = 0.2915 T_{fl}$$

$$T_{st} = \frac{1}{2} (T_s + T_{\max}) = \frac{1}{2} (0.2915 + 2.25) T_{fl}$$

$$= 1.27 T_{fl}$$

X = Per unit of F.L. Torque against which motor could be started.

۳۳۸

$$t_{sl} = \frac{GD^2 \times 1446}{375 (1.27 T_{fl} - X T_{fl})} = 14$$

$$(1.27 - X) = \frac{20 \times 1446}{375 \times 8.22 \times 14}$$

$$X = 0.6$$

الباب السابع

تطبيقات على وسائل التحريك الكهربى
(أولاً) المبادئ الأساسية لوسائل الجر الكهربى
(Basic principles in electric traction)

(١ - ٧) الأنظمة المستخدمة فى وسائل النقل الكهربى :

(Different Systems applied in electric transportation)

يوجد نوعان أساسيان من الأنظمة المستخدمة فى وسائل النقل الكهربى،
يختلف كل منهما عن الآخر بالنسبة لموضع اليندوع الذى يغذى المحرك الكهربى،
القائم بالتحريك ، بالطاقة الكهربائية . فى النوع الأول ، وهو القاصر على
وسائل النقل البرى عادة ، ويطلق عليها اسم الجر الكهربى (electric traction)
يوصل المحرك الكهربى الذى تحمله القاطرة إلى شبكة الأسلاك الممتدة من
محطة التغذية (أو مجموعة المحطات المترابطة بالنسبة للمؤسسات الكبيرة) ، التى
تولد فيها الطاقة الكهربائية على نطاق يكفى لتغذية جميع المركبات المنتشرة على
كافة الخطوط ، ثم يتم توزيع الطاقة على هذه المركبات عن طريق شبكة
الأسلاك التى توجد فى كل طريق . وقد يستدعى الأمر ، فى هذه الحالة
وجود محطات فرعية (substations) لتعويض الضغط المفقود فى أسلاك
النقل ، إذا كان هذا يحدث بسبب طول الطريق . ويختلف نوع محطات
التوليد ، من حيث كونها للتيار المتردد أو التيار المستمر ، على حسب نوع
المحركات التى تسير المركبات وهل هى محركات تيار متردد أو محركات تيار
مستمر ، وقد يقتضى الأمر ، عند استخدام محركات التيار المستمر ، وجود
شبكة عمومية (The Grid) للتيار المتردد ، إنشاء محطات تحويل
(Converting stations) لتغذية شبكة أسلاك الجر الكهربى ، أو يمكن
تغذيتها من الشبكة العمومية مباشرة ، مع تزويد المركبات بأجهزة التحويل
المناسبة ، التى تربط بين محرك التيار المستمر ، ويندوع التيار المتردد .

النوع الثانى من أنظمة وسائل النقل الكهربى الأساسية هو ذلك الذى تحمل فيه الوسيلة على ظهرها ، سواء كانت قطارا ، أو سفينة ، أو جرارا أو ما أشبهه ، جميع مقومات توليد الطاقة الكهربائية أو مخزونها التى تشتمل ، بالنسبة لل توليد ، على جميع مهابت محطة توليد كهربية كاملة من آلة ميكانيكية بوسائل تشغيلها ، ومولد كهربى بأجهزة نقل الطاقة الكهربائية إلى المحرك الكهربى القائم بالتحريك ، وتشتمل ، بالنسبة للتخزين ، على كل ما يدم من البطاريات ووسائل صيانتها وتعويض المخزون من الطاقة الكهربيه بها ونكون الآلة الميكانيكية المستخدمة فى القطارات والسفن ، التى تنضوى تح نواها هذا النوع ، من نوع الديزل ، فتوصف لذلك بأنها قطارات أو سفن ديزل كهربية (Diesel-electric trains or ships) ، بينما تستخدم الجرارات (Trucks) واللوريات (Lorries) ، الآلة التى تدار بالبترول ، فيطلق عليها لذلك اسم جرارات أو لوريات البترول الكهربية (Petrol-electric trucks or Lorries) أما مركبات الطرق البرية (road vehicles) فهى التى تحمل البطاريات ، وتعمل بمخزون الطاقة الكهربائية .

هذا وسوف تقتصر دراستنا فى هذا الباب على بعض ما يدخل فى نطاق وسائل الجر الكهربى ، أى النقل البرى ، وما يخص القطارات الكهربيه منها بالذات .

(٢ - ٧) مزايا وعيوب استخدام وسائل الجر الكهربى .

(Advantages and disadvantages of Electric Traction)

لاشك أن من أهم مزايا استخدام المحرك الكهربى فى وسائل الجر هو النظافة التامة التى تصاحب ذلك ، وهو مقنم كبير ، وخصوصا فى النقل على الطرق تحت الأرضية (sub-Ways) ، وفى الأنفاق (Tunnels) ، كما أن تغير السرعة ، بالغ النعومة فى التدرج (very smooth variation of speed) ،

الذى يمكن أن يوفره لنا المحرك الكهربى ، بالإضافة إلى التعجيل عالى القيمة ، الذى يبلغ من ١٦ إلى ٣٢ كيلو متر/الساعة فى كل ثانية بالقياس إلى ٦٥ ر . إلى ٩ ر . الذى نحصل عليه فى حالة القطارات التى تسير بالبخر ، من المزايا بالغة الأهمية ، وبخاصة بالنسبة لحركة النقل إلى الضواحي (Suburban Traffic) ، حيث يحتاج الأمر إلى تسير القطارات فى دورات سريعة ، مع مراعاة تعدد محطات الوقوف ، وذلك فى أوقات الازدحام (rush hours) ، فى الصباح وفى الظهيرة وعند المساء . كذلك يمكن باستخدام الجر الكهربى حمل ضعف العدد من الأنفس على نفس الطريق ، ومع وجود نفس عدد المحطات ، التى تستخدم فى حالة القطارات البخارية ، وذلك بسبب ارتفاع قيمة السرعة مع وجود عدد كبير من المحطات فى الجر بالكهرباء . هذا ونظرا لأن اتساع المحطات فى المدن تحده الاعتبارات الإقتصادية ، بالنسبة لوجود عدد كبير من المحطات ، يعد حسن التحكم فى القاطرة الكهربائية من المزايا الكبيرة ، لأنها تساعد على جعل المحطة ، التى لا يمكن أن تتواجد فيها سوى قاطرة بخارية واحدة ، تستوعب قاطرتين كهربائيتين فى نفس الوقت .

تحتاج القاطرة الكهربائية إلى وقت أقل بكثير مما تحتاجه القاطرة البخارية للصيانة والإصلاح ، مما يجعلنا نستطيع استخدام عدد أقل من القطارات الكهربائية فى خدمة مرور ذى كثافة معينة ، كما أن تكاليف صيانة وإصلاح هذه القطارات يبلغ ٥٠٪ فقط من تلك التى تحتاجها القطارات البخارية . ونظرا لأن القاطرة الكهربائية لا تحتاج إلى وقت لتجهيزها للعمل ، بينما تحتاج القاطرة البخارية إلى مالا يقل عن ساعتين حتى يتولد فيها البخار ، فإنه يمكن تنظيم العمل بكفاءة أكثر علوا فى حالة القطارات الكهربائية ، خاصة بالنسبة للسائقين الذين يتوالون العمل على قيادة هذه القطارات .

وان التخلص من الأدخنة الكثيفة ، والجرات التى تتطاير من القطارات البخارية ، هو فى حد ذاته مكسب كبير فى حالة الجر الكهربى ، حيث تكون القيادة أكثر أمنا ، ولا تتعرض المباني والأجهزة للتلف بسبب عوامل

التصديّة الناشئة عن سحب الدخان والبخار المتصاعدة من القاطرات البخارية. كذلك تنعكس فوائد الفرملة بالوسائل الكهربية على عمر الفرامل بالاطالة ، نتيجة لبطء استهلاكها ، كما انها غالبا ما تخفض تكاليف الخدمة ، وخصوصا في الأحوال التي تسترجع فيها الطاقة الى الينبوع بدلا من تبديدها .

هذا بالنسبة لمزايا الجر الكهربى اذا قورن بالجر باستخدام القطار البخارية ، وبخاصة داخل المدن ، أما بالنسبة للمساوى فيأتى في المرتبة الأولى أن أى عطل في الينبوع لمدة دقائق سوف يؤدى الى ارتباك في حركة مرور القطارات قديمتا الى بضع ساعات ، كما أن خطوط النقل الكهربية الخاصة بالتلغراف أو التليفون ، والتي لا بد وأن تجرى بجذائها عادة شبكة تغذية القطارات الكهربية ، سوف تتأثر بهذه الشبكة ، مما ينتج عنه غالبا حدوث تشويش في الرسائل التي تنقلها ، بسبب ظاهرة التداخل (interference) بين الخطوط الممتدة على نفس الطريق .

(٣-٧) الانظمة المختلفة لتغذية شبكات الجر الكهربى :

(Different supply systems in electric traction)

يتم توليد التيار المستمر (أو تحويله من تيار متردد) لتغذية شبكات الجر الكهربى ، كما يمكن التغذية بالتيار المتردد ، أحادى المرحلة أو ثلاثى المراحل . وهذا يحدد بطبيعة الحال نوع المحرك الذى يقوم بالتحريك الكهربى . وعند الاصرار على استخدام محرك التيار المستمر ، وهو ذو مميزات خاصة فى هذا المجال ، يجب توافر جهاز التحويل المناسب على القاطرة ، بين الشبكة والمحرك ، للمواءمة بين نظام الينبوع ونوع المحرك .

تكون التغذية بالنسبة لعربات الترام (tram-Cars) بالضغط المستمر على حوالى ٦٠٠ فولت ، وتمثل القضبان (rails) الخط الراجع بالتيار (return line) . ونظرا لأن هذه القضبان تجرى فى الأرض ، فهناك احتمال

لحدوث تيارات تسرب (leakage currents) تتسرب منها الى أية خطوط أنابيب قريبة ، مما يسبب المتاعب بالنسبة لصيانة هذه الأنابيب ، وكذلك أدائها مهامها على الوجه المطلوب . لذلك يتحتم مراعاة أن تكون القضبان ذات توصيل كهربى على الجوده ، بحيث يسهل على التيار المرور فيها ، وعدم الانتشار حولها الى مسافات بعيدة . وتنص التنظيمات (regulations) الخاصة في هذا الشأن على ألا يزيد هبوط الضغط عن ٧ فولت بين أية نقطتين على الخط الراجع ، وهو المتصل بالقطب السالب لينبوع التيار المستمر . وليس من الحكمة فى شيء استخدام قضبان ضخمة ذات مقاطع كبيرة لتقليل مقاومتها ، وبالتالي تنفيذ هذا الشرط ، عندما يكون التيار كبيرا ، وإنما تستخدم فى مثل هذه الأحوال الإضافات (boosters) لتعويض هبوط الضغط من نقطة لأخرى (هندسة الآلات الكهربائية صفحة ٣٦٨) على الخط . وعندما يكون الخط الراجع على مقربة من بعض خطوط الأنابيب فإن ضغطه لا يجب أن يرتفع عن ٤ فولت أو ينخفض عن فولت واحد بالنسبة لضغط الأرض . هذا ويتم التغذية من ينبوع باستخدام خط هوائى (trolley Wire) غالبا ، أو خط ممتد فى مجرى أرضى . وفى حالة الخط الهوائى يجب ألا يزيد الضغط عن ٦٥٠ فولت عند محطة التغذية ، ولا يقل عن ٥٥٠ فولت على أية نقطة على الخط . وبالنسبة لعربات التrolley buses يكون الخطان ، التغذية والراجع ، هوائيين ، على ضغط ٦٠٠ فولت ، ولا يحتاج الأمر فى هذه الحالة الى استخدام الإضافات ، حيث لا يخشى من تسرب التيار ، كما هو الحال عند استخدام خط الراجع الأرضى .

ولا يخفى أنه كلما زاد ضغط ينبوع عن ٦٠٠ فولت ، كلما حصلنا على خواص تشغيل أفضل بالنسبة للخط والمحرك ، علاوة على المزايا الاقتصادية الناشئة عن قلة المفقودات فى الخط والمحرك ، إلا أن احتياطات الأمن ، بالنسبة للإنسان والحيوان ، يجب أن تزداد بشكل ملحوظ . وتستخدم فى

إيطاليا وبلجيكا وبولندا ضغوط مستمرة تبلغ ٣٠٠٠ فولت ، وفي مونترال ٢٤٠٠ فولت ، وفي خط باريس - أورليانز - ميدي ١٣٥٠ فولت .

وفي حالة استخدام التيار المتردد احدى المرحلة تعمل الخطوط في النمسا والمانيا والسويد وسويسرا ، وكثير من البلدان الأخرى ، على ضغط ١٥ كيلوفولت بتردد ١٦ ٢/٣ هرتز ، وفي بنسلفانيا على ضغط ١١ كيلو فولت بتردد ٢٥ هرتز . ويحد من قيمة التردد ، في هذا القطاع من قطاعات توليد القدرة الكهربائية ، الصعوبات الجمة المرتبطة بعملية التبديل ، وهي التي يمكن معالجتها بخفض قيمة التردد في محركات التيار المتردد أحادية المرحلة ذات المبدل (single phase AC commutator motors) ، التي تستخدم لتحريك القطارات على هذه الخطوط .

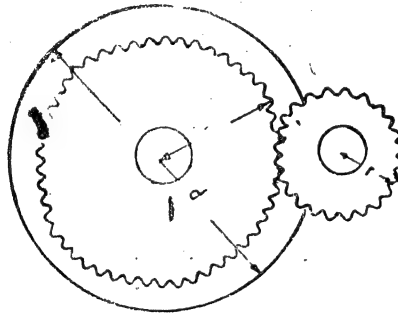
ويستخدم التيار ثلاثي المراحل في تغذية بعض خطوط النقل للجر الكهربائي في بعض النواحي الجبلية في إيطاليا ، وذلك على ضغط ٣٦٠٠ فولت بين الخطوط . ويستخدم خطان هوائيان في هذه الحالة ، بينما يمثل القضيب الخط الثالث بالنسبة للمراحل . ولا تستخدم محولات في هذه الحالة لأن المحركات تعمل على ضغط الخط مباشرة . ويكون التردد ١٦ ٢/٣ هرتز ، كما تستخدم الفرملة بالتوليد المرتجع ، وهو ما يمثل أحد المزايا الكبرى لهذا النظام في النواحي الجبلية .

هذا ويشير التطور إلى الانصراف عن استخدام التغذية بالتيار المتردد ثلاثي المراحل ، بينما ينحو بشدة نحو استخدام التغذية بالتيار المتردد احدى المرحلة بالتردد العادي ، أي ٥٠ هرتز ، وإلى حذو نحو التغذية بالتيار المستمر على ضغط عالي .

(٧-٤) قوانين الميكانيكا الخاصة بحركة القطار :

(Mechanics of train motion)

تنتقل الحركة من عمود إدارة المحرك، الذى يبذل عزم الدوران T_m كيلو جرام متر، إلى عمود إدارة عجلتى القيادة (Driving wheel axles)، اللتين تحركان القاطرة على القضبان، باستخدام صندوق تروس تخفض السرعة من n_m لفة فى الدقيقة إلى n لفة فى الدقيقة، حتى يمكن الاستفادة من مزايا المحرك ذى السرعة العالية. يبين شكل (٧-١) رسم تخطيطى للمنتج واحد عجلتى



شكل (٧-١)

القيادة (Driving wheel)، وصندوق التروس بينها، حيث r هو نصف قطر الترس الصغير، على عمود إدارة المنتج، R نصف قطر الترس الكبير الركب على محور إدارة عجلتى القيادة، التى قطر كل منها d ، مقاسة جميعها بالامتار. فإذا كانت قوة الجر (tractive effort) التى تحرك كلا من الترسين، عند التقاء حافتيهما كما هو مبين فى الشكل هى f' كيلوجرام، وكانت قوة الجر على عجلة القيادة، التى تحركها على الطريق، هى f كيلو جرام، وباعتبار η ، ε هما معامل الجودة ونسبة التحويل لصندوق التروس، نجد أن:

عزم الدوران الناشئ عن قوة الجر على عمود إدارة عجلتى القيادة T

عبارة عن $d \times f$ أو $R \times f'$ كيلو جرام متر، وعزم الدوران المعطى على عمود إدارة المحرك عبارة عن T_m ، وبأخذ η ، ε في الحسبان نستطيع الحصول على مقدار قوة الجر، باعتبار أن القوة المنقولة من المحرك بالكيلو واط P_m إلى عجلتي القيادة تكون بالكفاءة η ، نتيجة لوجود صندوق التروس، ووضع القدرة بدلالة عزم الدوران على النحو الآتي :

$$T_m = 974 \frac{P_m}{n_m}, \quad P_m = \frac{T_m n_m}{973}, \quad T_m = f' \times r \quad (٧-١)$$

$$T = 973 \eta \frac{P_m}{n} = \frac{d}{2} \times f$$

$$\therefore f = \eta \frac{2 T_m}{d} \frac{n_m}{n} = \varepsilon \eta \frac{2 T_m}{d} \quad (٧-٢)$$

$$T = \eta T_m \frac{n_m}{n} = \eta f' r \times \frac{R}{r} = \eta f' R$$

$$\therefore \frac{d}{2} f = \eta f' R, \quad f = \eta f' \left(\frac{2R}{d} \right) \quad (٧-٣)$$

تتوقف قيمة قوة الجر، التي يمكن الاستفادة بها، على الوزن الراكب فوق عجلات القيادة، وعلى معامل الالتصاق (Coefficient of adhesion) بين عجلات القيادة والقضبان، الذي يمكن تعريفه على النحو التالي :

$$\text{معامل الالتصاق} = \frac{\text{قوة الجر اللازمة لانزلاق العجلات}}{\text{الوزن الراكب فوق العجلات}}$$

الجدول الآتي يعطى قيمة معامل الالتصاق للجرارات الكهربائية على القضبان الجافة :

| ٩٦ | ٦٤ | ٤٨ | ٣٢ | ١٦ | صفر | السرعة ، كيلو متر في الساعة |
|------|------|------|------|------|------|-----------------------------|
| ٠.٠٩ | ٠.١٠ | ٠.١٢ | ٠.١٤ | ٠.١٨ | ٠.٢٥ | معامل الالتصاق |

وإذا حدث وتلطخت القضبان بمادة شحمية ، فإن هذا يؤدي إلى انخفاض معامل الالتصاق إلى حوالي ٠.٠٨ . وتبرز في هذا المضمار مزايا أخرى للجر الكهربائي على الجر باستخدام القاطرات البخارية ، فبينما نجد أن مائة في المائة من الوزن المجرور يكون راكبا فوق عجلات القيادة في عربة يسيرها محرك كهربائي خاص بها ، وأن سبعين في المائة أو أكثر من الوزن المجرور يكون راكبا فوق عجلات القيادة في القاطرة الكهربائية ، نجد أن هذه النسبة لا تزيد على خمسين في المائة فقط في حالة القاطرات البخارية . وإلى جانب ذلك فإن هناك من الأسباب ما يدعو إلى زيادة قيمة معامل الالتصاق في الجر الكهربائي عنها في الجر باستخدام القاطرة البخارية ، مثل إعطاء المحرك الكهربائي عزم دوران ثابت القيمة ، بينما تعطى الآلة البخارية عزم دوران غير منتظم ، مما ينتج عنه الهزات الفجائية والتزلق ، كما أنه بحكم التركيب الطبيعي للآلة البخارية تكون عجلات القيادة مكدسة في حيز ضيق ، بينما يمكن توزيع المحركات على طول القطار . وهذا يعني أن أقصى قيمة ممكنة لقوة الجر التي يمكن الحصول عليها في حالة الجر الكهربائي، تكون أكثر ارتفاعا عنها في حالة الجر بالقاطرات البخارية .

يحدد معامل الالتصاق قيمة النهاية العظمى للتعبيل الذي يمكن أن نحصل عليه على النحو التالي: إذا كان الوزن المجرور كله راكبا على عجلات القيادة ، بمعنى أن القاطرة تجري بمفردها ، وباعتبار أن التعبيل يبدأ بالسرعة صفر ، فإن معامل الالتصاق على حسب الجدول السابق يكون حوالي ٠.٢٥ . في هذه الحالة تكون أقصى قيمة لقوة الجر F_0 كيلو جرام عبارة عن $0.25W$ ، حيث W هو الوزن الراكب على عجلات القيادة بالكيلو جرام ، وتكون

الكتلة المراد تعجيلها عبارة عن $\frac{W}{g}$. فإذا كانت a هي العجلة المطلوبة متر لكل ثانية^٢ ، نجد أن .

$$F_a = 0.25 W = \frac{W}{g} \times a = \frac{W}{9.81} \times a$$

$$\therefore a = 9.81 \times 0.25 = 2.652 \text{ m/sec}^2 \quad (٧ - ٤)$$

$$= 35.3 \times 0.25 = 8.82 \text{ Km/h/ sec}$$

$$[1 \text{ m/sec} = 3.6 \text{ Km/h}]$$

وفي العادة يكون ثلث الوزن المجرور فقط راكبا فوق عجلات القيادة ، مما يعني أننا نحصل على ثلث هذه القيمة فقط ، أي حوالي ٨٨ . متر/ثانية^٢ (يساوي ٢٩٤٣ كيلو متر / ساعة / ثانية) في الحياة العملية . هذا ويمكن الحصول على تقصير في أثناء الفرملة اكبر من ذلك بكثير ، وقد تصل قيمته إلى حوالي ٥ كيلو متر / ساعة / ثانية ، حيث أنه يمكن تركيب القراميل على جميع العجلات .

إذا أثرت قوة جر مقدارها F_a كيلو جرام على كتلة وزنها W كيلوجرام فإن قيمة العجلة a الناتجة تتحدد من المعادلة :

$$F_a = \frac{W}{g} a \rightarrow a = \frac{9.81 \times F_a}{W} \text{ m/sec}^2$$

$$a = 35.3 \frac{F_a}{W} \text{ Km/h/ sec} \quad (٧ - ٥)$$

إن القاطرة الكهربائية هي وسيلة التحريك الكهربائية التي تسير القطار ، وعندما يتحرك القطار فإن هناك كتل تتحرك حركة خطية ، وهناك أيضا

ممثل تتحرك حركة دورانية . وتكمن في هذه الكتل كلها طاقة حركة اكتسبتها من عمود إدارة المحرك . ويمكن في هذه الحالة حساب عزم الخدافة الكلى المكافئ $(GD^2)_d$ منسوباً إلى عمود إدارة المحرك ، باستخدام المعادلة (١٧ - ٦) ، لايجاد العلاقات المختلفة ، على أساس عزم دوران معين للمحرك ، كما سبقت دراسته في وسائل التحريك الكهربائية . ونظراً لأننا نهتم في المرحلة الحالية بالحركة الخطية ، لدراسة حركة القطار ، فإن العجلة a المعطاة بالمعادلة (٥ - ٧) ، من أهم المعلومات التي نحتاج إليها في هذا الشأن ، وهي العجلة الناشئة عن قوة الجر F_a ، التي ترتبط بعزم دوران المحرك T_m ، المبذول على عمود إدارته بالمعادلة (٢ - ٧) ، عندما نعتبر أن $f = F_a$. ويلاحظ أن دور W في حالة حركتنا الخطية هذه يقابل دور $(GD^2)_d$ في حالة الحركة الدورانية السابق دراستها . وهذا يعني أن W يجب أن تمثل عزم القصور الذاتي المكافئ لكل من الكتل المتحركة خطياً ، والكتل التي تتحرك دورانياً ، إذا راعينا أن القطار المتحرك بفعل قوة الجر F_a يحتوي على النوعين معا . وفي الحياة العملية يمكن الحصول على الوزن المكافئ بالكيلو جرام W_e ، الذي يمثل عزم القصور الذاتي الكلى المكافئ للقطار المتحرك ، باضافة من ١٠٪ إلى ٢٠٪ إلى الوزن الميت W كيلو جرام (dead weight) للقطار . وبذلك تصبح المعادلة (٥ - ٧) :

$$F_a = \frac{W_e}{9.81} a \text{ Kg} , a = 9.81 \frac{F_a}{W_e} \text{ m/sec}^2$$

$$a = 35.3 \frac{F_a}{W_e} \text{ Km/h/sec} \quad (٦ - ٧)$$

تمثل قوة الجر التي نحتاج إليها لاكتساب العجلة a ، وهي لازمة في المرحلة الاولى لبداية الحركة ، حتى يصل القطار الى السرعة المطلوبة . نحتاج علاوة على ذلك الى قوة جر F_r للتغلب على قوة المقاومة التي يمكن أن تواجه

القطار في خلال جركته ، وهي تعطى عادة كنسبة قيمتها r من وزن القطار ، حيث يطلق على r اسم المقاومة النوعية للقطار (specific train resistance) ، وتكون عادة دالة للسرعة :

$$F_r = r \times W \quad (٧-٧)$$

وإذا كان القطار يصعد منحدرًا يرتفع عن المستوى الأفقي بالنسبة C [تمثل النسبة C مقدار الارتفاع عن المستوى الأفقي إلى المسافة التي يصعد بها على المنحدر نفسه ، أي جيب زاوية ميل المنحدر على المستوى الأفقي ، وتوصف بأنها مقدار الانحدار (gradient)] ، فلا بد من توافر قوة جر F_c للتغلب على مركبة الوزن CW ، التي تجر القطار إلى أسفل المنحدر . وعندما يكون القطار هابطًا بالمنحدر فإن CW تساعد قوة الجر التي تبذلها المحركات ، لذلك تحتسب بإشارة سالبة ، وعلى هذا الأساس نجد أن قوة الجر الكلية f بالكيلو جرام اللازم بذلها عموماً لتحريك القطار بالمعجلة المنتظمة a متر لكل ثانية^٢ عبارة عن :

$$f = F_a + F_r \pm F_c = 0.102 a W_e + W_r \pm 1000 CW \text{ Kg}$$

(٧-٨)

تعطى a عادة بالكيلو متر في الساعة لكل ثانية ، وهذا هو الشكل العملي للتعبير عن المعجلة في هذه الحالة ، لأنه يبين لنا مقدار الزيادة في السرعة معبراً عنها بالكيلو متر لكل ساعة في الثانية الواحدة ، كما أن W_e و W تعطيان بالطن ، ويعبر عن قيمة المقاومة r بالكيلو جرام لكل طن ، وعن قيمة الانحدار C بالنسبة المئوية ، فتصبح المعادلة (٧-٨) :

$$f = 28.3 a W_e + W r + 10 CW \text{ Kg} \quad (٧-٩)$$

وذلك على أساس أن وزن القطار بالطن ، والمقاومة r بالكيلو جرام لكل طن و C هي النسبة المئوية للانحدار .

عندما يتحرك القطار بسرعة v كيلومتر/الساعة بقوة الجر f كيلوجرام ،
فانه يحتاج الى القدرة P كيلوات ، حيث نجد أن :

$$P = 9.81 f \times v \times \frac{1000}{3600} \times 10^{-3} \text{ KW}$$

$$= 0.00273 f v \text{ KW} \quad (٧-١٠)$$

مثال (١) :

a motor-Coach train weighing 240 tons is accelerated up a gradient of 1 in 250 at a mean acceleration of 2 Km.p.h./sec up to a speed of 50 Km.p.h. Find the required tractive effort in this case and the power output to the driving wheel axles at the end of the accelerating period, provided the train resistance is 5 Kg per ton and the effective weight is 10% more than the dead weight.

نجد في هذه الحالة ، عند استخدام المعادلة (٩ - ٧) أن :

$$a = 2 \text{ Km.p.h./sec} \quad W = 240 \text{ t} \quad W_e = 1.1 \times 240$$

$$W_e = 264 \text{ tons}$$

$$a = 5 \text{ Kg/tons} \quad \text{and } C = \frac{1}{250} \times 100 = 0.4$$

$$\therefore f = 28.3 \times 2 \times 264 + 240 \times 5 + 0.4 \times 40 \times 10$$

$$= 17210 \text{ Kgs}$$

في نهاية فترة التعجيل نجد أن القدرة المستفاد بها على عمود ادارة عجلات القيادة ، على حسب المعادلة (١٠ - ٧) عبارة عن :

$$P = 0.00273 \times 17210 \times 50 = 2350 \text{ KW}$$

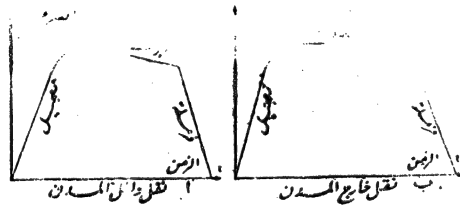
(٧-٥) منحنى السرعة مع الزمن : (Speed - time curve)

يمكن اعطاء كل المعلومات الاساسية ، الخاصة بتحريك القطار ، من خلال معرفة منحنى واحد ، وهو المنحنى الذى يربط بين السرعة والزمن لحركة القطار فى نطاق معين ، يحدد عادة بالتوقف عند محطتين متتاليتين . فالسرعة التى يسير بها القطار عند لحظة معينة يمكن قراءتها من المنحنى مباشرة ، والعجلة التى تتغير بها هذه السرعة ، عند نفس اللحظة ، يمكن حسابها بمعرفة ميل المماس للمنحنى عند النقطة المحددة عليه بهذه اللحظة ، كما أن المسافة التى يقطعها القطار بين لحظتين متتاليتين ، تمثلها المساحة التى يحصرها المنحنى مع محور الزمن بين احداثى السرعتين عند هاتين اللحظتين . ويبدأ منحنى السرعة مع الزمن بالاحداثيين صفر للسرعة وصفر للزمن ، وهى النقطة التى تمثل بدء تحرك القطار مغادرا إحدى المحطات ، وينتهى المنحنى بالاحداثيين صفر للسرعة ومقدار الثوانى أو الدقائق للزمن الذى يقطع فيه القطار المسافة بين محطتين ، وهذه هى النقطة التى تمثل توقف القطار عند وصوله إلى المحطة التالية . وتتكرر نفس العملية بنفس الشكل تقريبا بين المحطات المتتالية ، مما يجعلنا نكتفى بدراسة المنحنى الذى يمثل الحركة بين محطتين متتاليتين ، ولمرة واحدة فقط .

هذا ويمكن تقسيم منحنى السرعة مع الزمن الى أربعة مراحل متتالية ، تمر بها الحركة بين كل محطتين ، سواء كان القطار يسير داخل المدينة ، أو يربط بين المدن المختلفة ، باعتبار أن كل مدينة محطة وقوف . ويكون الاختلاف فى مراحل الحركة ، بين داخل المدينة وخارجها ، فى المدة التى تستغرقها كل مرحلة ، ونسبتها الى مقدار المدة الكلية بين الوقفتين .

يبدأ القطار حركته من السكون بالتعجيل المناسب ، الذى لا يسبب ازعاجا للراكبين ، وبحيث يصل الى سرعة معينة ، تتوقف على قدرة المحرك والزمن المحدد لقطع المسافة بين المحطتين ، وتسمى الفترة التى تمضي بين بدء الحركة

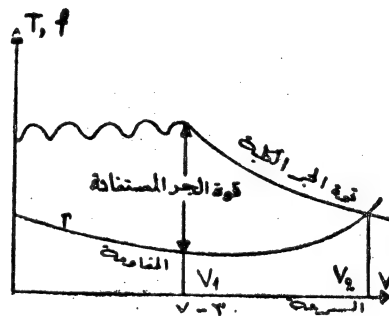
والوصول الى السرعة المطلوبة باسم فترة التعجيل (acceleration period).
 تمضى بعد ذلك فترة تدعى بالانطلاق الحر (free running)، حيث يسير القطار
 بسرعة منتظمة بالقيمة التي وصل اليها في نهاية فترة التعجيل. وهذه الفترة تستغرق
 معظم الوقت بين المحطتين، بالنسبة للحركة خارج المدن، ولكنها تكون
 قصيرة عادة، ويمكن أن تختفي تماماً بالنسبة للحركة داخل المدن. وعندما
 تفصل المحركات عن الينوع تبدأ فترة الارساء (Coasting)، ويكون
 القطار ناشئاً عن القصور الذاتي، بفعل طاقة الحركة التي اكتسبها في خلال
 المراحل السابقة، وتبدأ سرعته في الانخفاض نتيجة للمقاومة التي يلقاها في
 أثناء ذلك. وبعد أن تنخفض سرعة القطار الى مستوى معين في فترة الارساء
 تبدأ فترة الفرمل (Braking period)، فتعمل الفرامل (كهربية أو ميكانيكية
 أو احدهما بعد الأخرى) على ايقاف القطار في اللحظة المناسبة عند المحطة
 التالية. يبين شكلاً (٢ - ٧) ب منحنى السرعة مع الزمن بشكله التقليدي
 في حالتى النقل داخل المدن وخارجها، حيث يلاحظ أن فترة الانطلاق الحر
 غير موجودة في المنحنى الخاص بالنقل داخل المدينة، كما سبقت الإشارة اليه
 كما يلاحظ أن فترة التعجيل تنقسم الى مرحلتين، تكون التعجيل في الأولى منها



(شكل ٧ - ٢)

ثابت، حيث نجد أن العلاقة بين السرعة والزمن خطية، وفي المرحلة الثانية
 يتناقص التعجيل تدريجياً حتى تصل قيمته الى الصفر، لكي يصبح القطار
 سائراً بسرعة منتظمة، أو لكي تبدأ فترة الارساء. لذلك نجد أن العلاقة بين

السرعة والزمن في هذه المرحلة تمثل بمنحنى يكون المماس له افقيا عند النقطة التي تمثل نهاية فترة التعجيل ، بما يعنى أن قيمة العجلة قد وصلت الى الصفر عند هذه النقطة . وفي المرحلة التي يكون التعجيل فيها منتظما أو ثابت القيمة يجب أن تكون F_e ، وهى المركبة فى قوة الجر اللازمة لإعطاء هذا التعجيل ، ثابتة القيمة أيضا . فبالنسبة للمحركات التي تستخدم فيها مقاومة فى أثناء فترة البدء ، نجد أن قيمة تيار البدء تتراوح بين نهايتين ، عظمى وصغرى ، نجعلهما متقاربتين على قدر الإمكان ، وذلك بقطع مقاومة البدء من الدائرة بانتظام ، على فترات ، على حسب التدرج فى زيادة القوة الدافعة الكهربائية المضادة المتولدة فى ملفات المنتج بازدياد سرعة المحرك . ونظرا لأن قيمة عزم الدوران فى هذه المحركات تتناسب مع شدة التيار ، حيث تحتفظ بشدة المجال ثابتة فى مثل هذه الاحوال ، فإن قيمة عزم الدوران ، الذى يبذله المحرك فى خلال فترة البدء ، تتراوح بين قيمتين متقاربتين ، باعتبار قيمة ثابتة متوسطة بينهما لا تختلف عن أى منهما الا اختلافا ضئيلا ، كما هو مبين فى شكل (٧ - ٣) ، ما بين سرعتين صفر ، v_1 . وشكل (٧ - ٣) هذا



شكل (٧ - ٣)

يبين العلاقة بين كل من السرعة كمتغير أصلي ، وبين كل من قوة الجر الكلية التي يبذلها المحرك ، متناسبة مع عزم الدوران ، والمقاومة التي يلقاها القطار في أثناء الحركة ، والفرق بينهما ، الذي هو عبارة عن قوة الجر المستفاد بها في تحريك القطار ، كدالة للسرعة . وعند السرعة v_1 تكون مقاومة البدء قد خرجت نهائيا من دائرة المحرك ، ولكن المحرك لم يصل إلى سرعته المعتادة بعد ، بمعنى أن القوة الدافعة الكهربائية المضادة لم تصل إلى كامل قيمتها بعد . وفي خلال زيادة قيمة السرعة من v_1 إلى v_2 ، وهي السرعة النهائية المقصودة ، تزداد قيمة القوة الدافعة الكهربائية المضادة ، فتقل قيمة التيار (ضغط الينوع V ثابت ، $V = E + I R_a$ ، حيث R_a مقاومة المنتج ثابتة أيضا) ، مما يؤدي إلى انخفاض قيمة عزم دوران المحرك تدريجيا ، وبالتالي قوة الجر الكلية التي يبذلها لتحريك القطار . ونظرا لأن القطار سوف ينطلق حرا بالسرعة الثابتة v_2 ، لذلك نجد أن الأمور مرتبة بحيث تصبح قوة الجر الكلية f_2 ، التي يبذلها المحرك عند هذه السرعة ، تساوي قوة الجر المكافئة لما يلقاه القطار من مقاومات حركته (بما في ذلك مركبة الوزن إذا كان يصعد منحدرًا) ، حيث تصبح قيمة العجلة صفرا وبالتالي F_a تساوي صفرا . هذا ، ويؤدي تناقص قيمة العجلة بين v_1 ، v_2 ، تمهيدا لتثبيت قيمة السرعة عند v_2 ، إلى تناقص في قيمة F_a المطلوبة ، مما يتماشى مع هبوط قيمة التيار ، التي تتسبب في انخفاض قيمة قوة الجر الكلية التي يبذلها المحرك بين هاتين سرعتين ، كما سبق ذكره ، وكما هو مبين في شكل (٣ - ٧) ، حيث يلاحظ أن مقاومة القطار تنخفض قليلا مع زيادة السرعة ، ثم تزداد معها بعد ذلك باطراد .

ويمكننا بمعرفة منحنى قوة الجر مع السرعة للمحرك ، وكذلك منحنى مقاومة القطار مع السرعة السابق بيانها في شكل (٣ - ٧) أن نحصل على منحنى السرعة مع الزمن ، وبالتالي المسافة التي يقطعها القطار مع الزمن ، كمل سنوضح فيما بعد . توجد في منحنى السرعة مع الزمن ثلاث سرعات ذات أهمية خاصة ، الأولى :

١ — السرعة القصوى (crest speed) ، وهذه أقصى سرعة يصل إليها القطار في خلال رحلته .

ب — السرعة المتوسطة (average speed) ، وهي عبارة عن متوسط قيمة السرعة بين البدء والوقوف .

ج — السرعة الحسائية (schedule speed) ، وهي السرعة المتوسطة بين الوقفتين ، أى مع أخذ فترة الوقوف في الحساب .

(٦ - ٧) منحنى شبه المنحرف للسرعة مع الزمن :

(Trapezoidal speed/time curve)

لسهولة الحساب ، مع عدم الوقوع في خطأ يذكر ، يمكننا تقريب منحنى السرعة مع الزمن إلى شبه منحرف ، قد يكون ثابت الارتفاع أو متغيره ، كما هو مبين في شكل (٤ - ١٧ ، ب) بالنسبة للحركة داخل المدينة ، كما أنه يكون ثابت الارتفاع ، كما هو مبين في شكل (٤ - ٧ ، ج) بالنسبة للسفر بين المدن . في هذه الحالة ، وباعتبار شبه منحرف ثابت الارتفاع نجد أن الحركة تنقسم إلى ثلاث مراحل مبسطة كما هو مبين في شكل (٤ - ٧) :

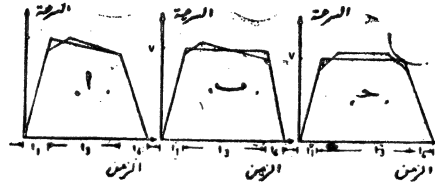
١ - في الفترة الزمنية t_1 ثانية ، وهي فترة التعجيل ، ترتفع السرعة بانتظام ، بالعجلة المنتظمة a كيلومتر في الساعة لكل ثانية ، من الصفر إلى v كيلومتر في الساعة ويقطع القطار المافة S_1 كيلومتر ، حيث نجد أن :

$$t_1 = \frac{v}{a} \text{ secs} , S_1 = \frac{1}{2} \frac{v}{3600} t_1 = \frac{v^2}{7200 a} \text{ Km}$$

(١١ - ٧)

ب — في الفترة الزمنية t_4 ثانية ، وهي فترة الترميم ، تنخفض سرعة

القطار بانتظام ، بمجلة التقصير المنتظمة b كيلومتر في الساعة لكل ثانية ، ويقطع القطار المسافة S_4 كيلومتر ، حيث نجد أن :



شكل (٧ - ٤)

$$t_4 = \frac{v}{b} \text{ secs} , S_4 = \frac{1}{2} \frac{v}{3600} t_4 = \frac{v^2}{7200 b} \text{ Km} \quad (٧ - ١٢)$$

حـ — في الفترة الزمنية المتوسطة t_3 ثانية يسير القطار المسافة S_3 كيلومتر بالسرعة المنتظمة v كيلومتر في الساعة ، ويمكننا حساب قيمة t_3 بدلالة زمن الرحلة الكلي بين البدء والوقوف T ثانية ، حيث نجد أن :

$$t_3 = T - (t_1 + t_4) = T - \left(\frac{v}{a} + \frac{v}{b} \right)$$

$$S_3 = \frac{v}{3600} t_3 = \frac{v}{3600} \left[T - \frac{v}{a} - \frac{v}{b} \right] \text{ Km}$$

(٧ - ١٣)

باستخدام المعادلات (٧ - ١١) إلى (٧ - ١٣) لإيجاد المسافة الكلية بين المحطتين S كيلومتر نجد أن :

$$S = S_1 + S_3 + S_4$$

$$= \frac{v^2}{7200 a} + \frac{v^2}{7200 b} + \frac{v}{3600} T - \frac{v^2}{3600 a} - \frac{v^2}{3600 b}$$

$$\therefore v^2 \left(\frac{1}{7200 a} + \frac{1}{7200 b} \right) + v \frac{T}{3600} + S = 0$$

$$\Theta \quad v^2 - v \cdot T + 3600 S = 0 \quad \text{أ (٧-١٤)}$$

$$\Theta = \frac{1}{2a} + \frac{1}{2b} = \frac{(a + b)}{2 a b} \quad \text{ب (٧-١٤)}$$

المعادلة (٧-١٤) من الدرجة الثانية في المسافة S بالكيلومتر ، وحلها هو .

$$v = \frac{T}{2\Theta} \pm \sqrt{\frac{T^2 - 4 \times 3600 \Theta S}{2 \Theta}}$$

$$= \frac{1}{2\Theta} \left[T - \sqrt{T^2 - 14400 \Theta S} \right] \text{ Km/h}$$

(٧-١٥)

أهملنا الإشارة الموجبة لأنها تعطي اجابة خاطئة ، حيث أن السرعة v ، باعتبار ما سبق ، يجب أن تكون أقل من القيمة $\frac{T}{2\Theta}$.

(٧-٧) تأثير السرعة الحسائية على كل من التعجيل والفرملة والمسافة :

نلاحظ أن المعادلة (٧-١٥) تعطي قيمة أقصى سرعة يمكن أن يصل إليها القطار في أثناء المرحلة بين محطتين ، على أساس زمن معين T ثانية تقطع فيه المسافة الكلية S كيلومتر بين المحطتين ، مع استخدام القيمتين a , b كيلومتر في الساعة لكل ثانية في التعجيل والتقشير على التوالي . وبتحديد زمن معين لوقوف القطار في المحطات يمكن معرفة قيمة السرعة الحسائية ، أو يمكن بالعكس تحديد قيمة أقصى سرعة ، أو التعجيل اللازم للحصول على سرعة حسابية معينة على خط معلوم ، كما يتبين من المثال التالي :

مثال محلول :

a train maintains a schedule speed of 40 Km/hr between two stations, which are 2.5 Km apart, when it makes a stop of 25 seconds at each station. The train accelerates at 2.2 Km/h/sec and brakes at 3.5 Km/h/sec. Calculate the value of the maximum speed which the train should attain during the run assuming a trapezoidal speed/time curve. Draw the corresponding speed-time curve.

تتراوح قيمتا التعجيل والتقصير ، بما يتناسب مع راحة المسافرين عادة ، في حدود معلومة لهذا الغرض . وبتحديد السرعة الحسابية ، مع زمن الوقوف بالمحطات ، يمكن تحديد زمن الرحلة T ، الذي ينظم حركة القطارات على الخط . ومن ثم تتحدد السرعة القصوى ، التي يجب ألا تزيد عن حد معين ، تبعاً لدواعي الأمن وتعليمات المرور ، وإلا وجب تعديل قيمة السرعة الحسابية للحصول على السرعة القصوى المناسبة . ففي المثال المعطى نجد أن :

$$a = 2.2 \text{ Km/h/sec} \quad \text{التعجيل :}$$

$$b = 3.2 \text{ Km/h/sec} \quad \text{التقصير :}$$

وهما قيمتان لاتجعلان المسافرين يشعرون بقلقـة في أماكنهم بسبب التغيرات المفاجئة في الحركة .

$$\frac{\text{المسافة بين المحطتين}}{\text{السرعة الحسابية}} = \text{زمن الرحلة } T + \text{زمن الوقوف في المحطة } t$$

$$t + T = \frac{2.5}{40} = 0.0625 \text{ hr} = 3.75 \text{ min} = 225 \text{ sec}$$

$$T = 225 - 25 = 200 \text{ sec.}$$

$$\theta = \frac{a + b}{2a b} = \frac{2.2 + 3.5}{2 \times 2.2 \times 3.5} = \frac{5.4}{4.4 \times 3.5}$$

$$= 0.37 \text{ sec.Km/h}$$

السرعة القصوى :

$$v = \frac{1}{0.74} \left[200 - \sqrt{(200)^2 - 14400 \times 0.37 \times 2.5} \right]$$

$$= 49.3 \text{ Km/h}$$

لكي نرسم منحنى السرعة مع الزمن يجب حساب كل من t_1 , t_3 , t_4 هي مبينة على شكل (٧-٤) ، ومن ثم يمكن رسم المنحنى المطلوب ، كما د في الشكل .

$$t_1 = \frac{v}{a} = \frac{49.3}{2.2} = 22.4 \text{ secs}$$

$$t_4 = \frac{v}{b} = \frac{49.3}{3.5} = 14.1 \text{ secs}$$

$$t_3 = 200 - (14.1 + 22.4) = 163.5 \text{ secs.}$$

(٧-٥) حساب منحنى السرعة مع الزمن :

يمكننا حساب العجلة a بمعرفة قيمة القوة المعجلة F_a والوزن المكافى للقطار W_e باستخدام المعادلة (٧-٦) . وتتوفر لنا المعلومات اللازمة لحساب قيمة F_a بالمعادلة (٧-٩) من منحنى قوة الجر ومقاومة القطار ، المعطيان في شكل (٧-٣) .

$$F_a = 28.3 a W_e = f - F_r - 10 CW$$

$$a = \frac{1}{28.3 W_e} \left[f - F_r - 10 CW \right] \quad (٧-١٦)$$

باستخدام المعادلة (١٦ - ٧)، ثم نرسم منحنى يربط بين $\frac{1}{a}$ كدالة للسرعة v كما هو ممثل في شكل (٥ - ٧)، حيث نجد أن قيمة $\frac{1}{a}$ ثابتة من صفر حتى v_1 ، وذلك لأن a ثابتة بين هذين الحدين، ثم تزداد قيمة $\frac{1}{a}$ على أساس أن تبلغ مالا نهاية عند v_2 ، لأن قيمة a تساوى الصفر عند هذه السرعة. بتقسيم المساحة تحت المنحنى إلى أكبر عدد ممكن من اشباه المنحرفات (أو المستطيلات)، يمكننا أن نحصل على الزمن t_i اللازم لتغير السرعة من قيمة معينة v_i إلى القيمة التي تليها v_{ii} ، كما هو موضح بالشكل، بحساب مقدار ما تمثله المساحة المحددة بقاعدتي شبه المنحرف، عند هاتين سرعتين، كاحداثيين. وهذا هو التطبيق البياني لحل المعادلة (١٧ - ٧)، حيث تمثل المساحة المحددة

المحسوبة التكامل $\int_{v_i}^{v_{ii}} \frac{1}{a} dv$. وبتجميع هذه المساحات يمكن معرفة الزمن اللازم

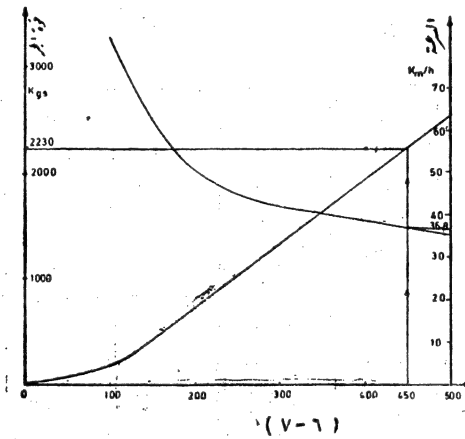
للوصول إلى أية سرعة على المنحنى الأصلي في شكل (٣ - ٧)، وبذلك يمكن رسم منحنى السرعة مع الزمن، كما يتضح من المثال الآتي :

مثال محلول :

a train of total weight 130 tons is equipped with 4 motors each rated 300 HP: The following table gives the motor and train resistance characteristics.

| Current (amps.) | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 |
|---------------------------|-----|------|------|------|------|
| Speed (Km/h) | 82 | 50.5 | 42.5 | 39.5 | 35.5 |
| Tractive effort (Kg) | 174 | 714 | 1322 | 1935 | 2540 |
| Train resistance (Kg/ton) | 5 | 4.5 | 4 | 4 | 4.5 |

The effective weight can be assumed 1.1 times the dead weight!
 (The mean value of the motor current in the acceleration period is 450 Amps and the braking retardation is made at a rate of 3.5 Km/h/sec. The distance between the two stations of 1.4 Km runs with an up grade of 0.12 per cent and has to be cut in 130 secs. Calculate the value of the r.m.s. current taken by each motor for the run.



شكل (٧-٦)

يبين شكل (٧-٦) منحنى السرعة كدالة للتيار، ومنحنى قوة الجر كدالة للتيار أيضاً، ونظراً لأن متوسط قيمة التيار في فترة التجميع تبلغ حوالي ٤٥٠ أمبير في كل محرك، فإن قوة الجر التي يبذلها كل محرك، كما يعطيها المنحنى هي ٢٢٣٠ كيلوجرام، وهي تظل فعالة حتى تصل السرعة إلى ٣٦٨ كيلومتر في الساعة، وذلك بالعجلة المنتظمة a كيلومتر في الساعة لكل ثانية. وتكون مركبة قوة الجر 10 CW اللازمة للتغلب على مركبة وزن القطار بسبب صعود المنحدر عبارة عن $10 \times 130 \times 0.12 = 156$ كيلوجرام. الوزن الفعال للقطار عبارة عن $130 \times 1.1 = 143$ طن. لكي يمكننا رسم منحنى السرعة مع الزمن نقوم أولاً بحساب قيم العجلة a

(ثم $\frac{1}{a}$) عند السرعات المعطاة وذلك بإيجاد قيمة F_a عند كل سرعة منها باستخدام المعادلة (١٦-٧) في كل مرة، ووضع النتائج في جدول على النحو التالي :

$$a = \frac{F_a}{28.3 W_e} = \frac{(f - F_r - 10 CW)}{28.3 \times 143}$$

$$= \frac{(f - F_r - 156)}{4045} \quad \text{Km/h/sec}$$

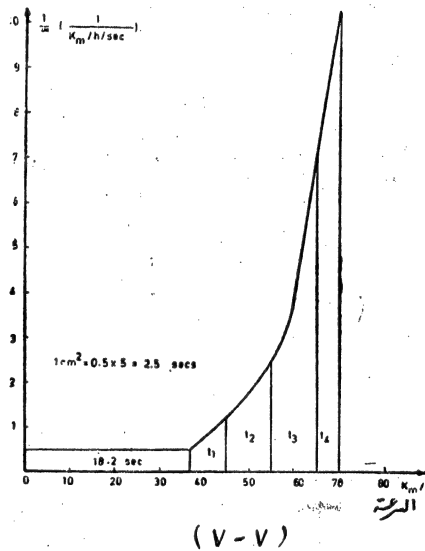
| v Km/h | < 36.8 | 40 | 45 | 50 | 60 | 70 | 80 |
|---------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| f Kgs | 8920 | 6720 | 4240 | 2880 | 1840 | 1200 | 760 |
| F_r | 585 | 520 | 520 | 585 | 585 | 650 | 650 |
| 10 CW | | | 156 | | | | |
| F_a | 8179 | 6014 | 3564 | 2139 | 1099 | 394 | - 46 |
| a | 2.02 | 1.495 | 0.883 | 0.529 | 0.272 | .0975 | 0.0114 |
| $\frac{1}{a}$ | 0.495 | 0.736 | 1.133 | 1.929 | 3.68 | 10.25 | -87.75 |

نحافظ على قيمة التيار ناتجة تقريبا في أثناء البدء بتقليل المقاومة تدريجيا ، فنحصل على قوة جر وبالتالي تعجيل ثابت القيمة مقداره ٢٠.٢ كيلومتر في الساعة اكل ثانية، حتى تصل السرعة إلى ٣٦.٨ كيلومتر في الساعة . ويكون الزمن اللازم لذلك ، وهو زمن فترة التعجيل الذي تزداد فيه السرعة خطيا ، عبارة عن :

$$t_1 = \frac{v}{a} = \frac{36.8}{2.02} = 18.2 \quad \text{secs}$$

وتمثل مساحة المستطيل، في الجزء الأول من منحنى $\frac{1}{a}$ مع السرعة، هذه القيمة، باعتبار أن كل سم² في الرسم $2.5 = 5 \times 0.5$ ثانية،

تصل السرعة إلى ٤٥ كيلومتر في الساعة بعد زمن مقداره $t_1 + 18.2$ ثانية، ونحصل على t_1 بعد المربعات تحت المنحنى بين الاحداثين عند سرعتين ٣٦.٨ و ٤٥ كيلومتر في الساعة، وفيما يلي نتائج كما يعطيها شكل (٧-٧).



شكل (٧-٧)

$$t_1 = 2.32 \times 2.5 = 5.8 \text{ secs.}$$

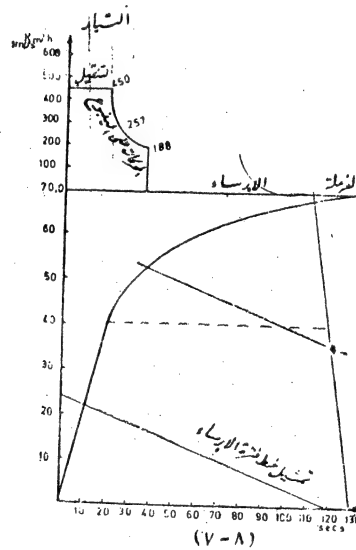
$$t_2 = 7.335 \times 2.5 = 18.35 \text{ secs.}$$

$$t_3 = 16.6 \times 2.5 = 41.5 \text{ secs.}$$

$$t_4 = 17 \times 2.5 = 42.5 \text{ secs.}$$

| v Km/h | 0 | 36.8 | 45 | 55 | 65 | 70 |
|---------|---|------|----|-------|-------|--------|
| t secs, | 0 | 18.2 | 24 | 42.35 | 83.85 | 126.85 |

حدد الزمن الكلى بـ ١٣٠ ثانية (على أساس تنظيم حركة القطارات)، كما حددت عجلة التقصير فى أثناء الترملة بـ ٣٥ كيلومتر فى الساعة لكل ثانية (على أساس إراحة الركاب لكي لا تصيدهم رجات)، وبذلك يمكننا رسم الجزء الخاص بفترة الترملة من المنحنى، وهو عبارة عن خط مستقيم يقطع منحنى الزمن عند اللحظة ١٣٠ ثانية، ويميل عليه بالقيمة ٣٥ كيلومتر فى الساعة لكل ثانية، فيمر باللحظة ١٢٠ ثانية عندما تكون السرعة (١٣٠ - ١٢٠) × ٣٥ = ٣٥٠ كيلومتر فى الساعة. ونظرا لقصر المسافة بين المحطتين، فلن تكون هناك فترة للانطلاق الحر، وإنما توجد فترة إرساء فقط تحدد على أساس



(شكل ٨-٧)

أن القطار يبدأ في تهدئة سرعته القصوى التي وصل إليها تحت تأثير مقاومة الحركة التي يلقاها ، وبفعل مركبة الوزن الناشئة عن وجود المنحدر ، فإذا أخذنا في الاعتبار أكبر مقاومة للحركة وهي ٦٥٠ كيلوجرام ، نجتكأن عجلة التقصير b_c كيلومتر في الساعة لكل ثانية في هذه الفترة عبارة عن :

$$b_c = \frac{650 + 156}{28.3 \times 143} = \frac{806}{404} = 0.2 \text{ Km/h/sec.}$$

وهذا يحدد ميل الخط الذي يمثل فترة الارساء ، حيث يمكن رسمه أولاً من نقطة الصفر وبهذا الميل مع منحنى الزمن ، باعتبار أن السرعة تتغير بالقيمة $0.2 \times 50 = 10$ كيلومتر في الساعة في زمن مقداره خمسون ثانية ، كما هو مبين في شكل (٨-٧). ويتحدد وضع خط فترة الارساء على منحنى السرعة مع الزمن برسم مواز لهذا الخط ، بحيث تصبح المسافة التي يحصرها المنحنى بأكمله هي المسافة بين المحطتين ، وهي ١٤ كيلومتر المعطاة . وهذا يستلزم تحديد مقياس الرسم على النحو التالي

كل ١ سم على المحور الافقى تمثل ١٠ ثواني

كل ١ سم على المحور الرأسى تمثل ٥ كيلومتر في الساعة

$$\text{كل ١ سم مربع تمثل } 5 \times \frac{10}{3600} = 0.139 \text{ كيلومتر}$$

$$1 \text{ cm}^2 \text{ represents } 0.0139 \text{ Km}$$

وبذلك نجد أن المسافة ١٤ كيلومتر تمثلها على الرسم

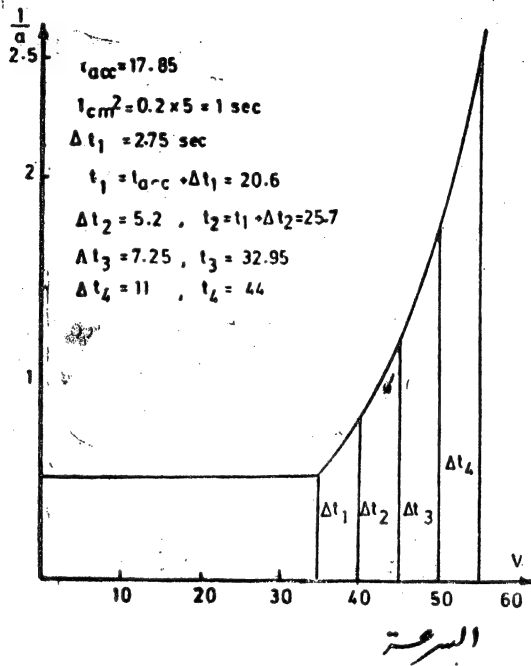
$$\frac{1}{0.0139} = 100.7 \text{ cm}^2$$

ويكون تحديد خط الإرساء بأن ترتفع، تدريجياً بموازاة محور الزمن، ونعد المربعات المحصورة حتى نحصل على الرقم المطلوب للمساحة مع الخط الافقى، ثم نعمل على تعديل ميل هذا الخط بحيث يصبح موازياً للخط المرسوم من قبل، وتكون المساحة المحصورة هي المساحة المطلوبة. يحدد خط الإرساء في هذه الحالة قيمة السرعة القصوى التي يصل إليها القطار، قبل أن يفصل المحرك من اليزنوع مباشرة، وهي عبارة عن نقطة تقاطع خط فترة الإرساء مع منحنى فترة التعجيل، وتبلغ في حالتنا هذه ٥٢٥ كيلومتر في الساعة. كما يحدد خط الإرساء أيضاً قيمة السرعة التي يصل إليها القطار لحظة بدء فترة الفرملة، وتمثلها نقطة تقاطع خط فترة الإرساء مع خط فترة الفرملة وهي عبارة عن ٣٦٥ كيلومتر في الساعة في المسألة المعطاة.

وبذلك نجد أن المرحلة تنقسم الى: أ - فترة تعجيل تصل فيها السرعة الى ٥٢٥ كيلومتر في الساعة، وتستغرق ٣٦ ثانية ب - ثم فترة إرساء لمدة ٨٣ ثانية، وتمهبط فيها السرعة حتى تصل الى ٣٦ كيلومتر في الساعة ج - وأخيراً فترة الفرملة التي تستمر لمدة ١١ ثانية تقريباً فقط، ويقف في نهايتها القطار.

لكي نحصل على القيمة الفعالة للتيار يجب علينا أولاً رسم منحنى التيار مع الزمن، وذلك بالاستعانة بمنحنى التيار مع السرعة، والسرعة مع الزمن، كما هو مبين بأعلى شكل (٨ - ٧). نربع بعد ذلك احداثيات التيار عن الأزمنة المختلفة لكي نحصل على منحنى مربع التيار مع الزمن، الذي نستخدمه لاجاد القيمة المتوسطة لمربع التيار، كما هو مبين بشكل (٩ - ٧)، حيث نجد أن القيمة المتوسطة لمربع التيار عبارة عن $3.85 \times 10^4 A^2$ ، وتكون القيمة الفعالة للتيار effective value أو جذر متوسط المربع (r.m.s. value)

عبارة عن $A = 196.2$ $\sqrt{3.85 \times 10^4}$. وهذه القيمة هي التي يتوقف عليها مدى الزيادة في درجة حرارة المحركات.



شكل (٩-٧)

مثال محلول (٧):

The following characteristics relate to each of two d.c. series traction motors rated at 208 HP with 0.94 efficiency, which are used for driving a 60 ton train, when supplied from 550 V supply:

| | | | | |
|-----------------------|------|-----|-----|-----|
| current (amps) | 100 | 200 | 300 | 400 |
| useful torque (Kg.m.) | 46 | 135 | 240 | 353 |
| Speed (r.p.m.) | 1168 | 795 | 668 | 606 |

Calculate and draw the speed-time curve and find the value of the r.m.s. current per motor for the run, assuming the following data : distance between two stations covered in 100 secs, constant train resistance of 5 Kgs/ton, accelerating weight of the train 10 % greater than the dead weight, braking retardation at a rate of 3 Km:p.h./sec, maximum speed attained during the run 55 Km/h, the track runs with a down gradient of 0.1 percent: driving wheel diameter 1050 mm, gear box ratio and efficiency 1 : 3.5 and 0.95 respectively. The constant starting current taken by each motor during rheostatic acceleration equals 1.2 times its full load rated current

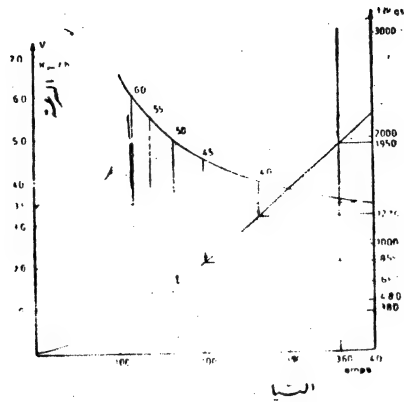
$$\text{Tractive effort} = \epsilon \eta \frac{2 T_m}{d}, \quad \epsilon = \frac{n_m}{n} = \frac{R}{r} = 3.5$$

$$\eta = 0.95, \quad d = 1.05, \quad f = \frac{3.5 \times 0.95 \times 2}{1.05} T_m = 6.33 T_m$$

$$v = \frac{\pi d n \times 60}{1000} = \frac{\pi d n_m \times 60}{1000 \epsilon} = 0.0566 n_m \cdot \text{Km/h}$$

| | | | | |
|-----------------------|-------|-----|------|------|
| current (amps,) | 100 | 200 | 300 | 400 |
| speed (Km/h) | 66 | 45 | 37.8 | 34.3 |
| tractive effort (Kgs) | 291.5 | 583 | 1520 | 2235 |

يبين شكل (١٠-٧) كل من قوة الجر والسرعة مع التيار كما حصلنا عليها في الجدول السابق .



شكل (١٠-٧)

$$I_{11} = 1.2 I_{11} = 1.2 \times \frac{208 \times 746}{0.9 \times 550} = 360 \text{ Amps}$$

من المنحنى في شكل (١٠-٧) نحصل على قوة الجر المناظرة في خلال فترة التعجيل ، وهي عبارة عن ١٩٥٠ كيلو جرام . متر لكل محرك

$$f \text{ (during acceleration) } = 1.50 \times 2 = 3900 \text{ Kgs}$$

$$10 \text{ CW} = 10 \times 0.1 \times 60 \text{ Kgs}$$

$$F_r = 60 \times 5 = 300 \text{ Kgs}$$

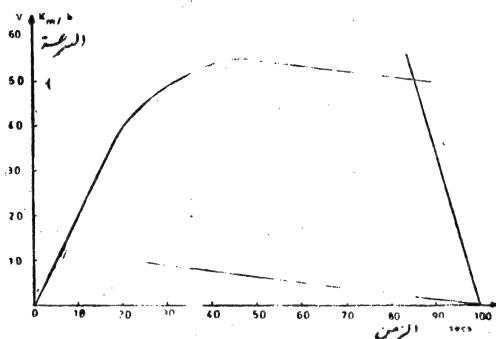
$$\text{Net resistance (} F_r - 10 \text{ WC) } = 2.0 \text{ Kgs}$$

$$W_e = 60 \times 1.1 = 66 \text{ tons}$$

$$\alpha = \frac{F_a}{28.3 W_e} = \frac{(f - 240)}{1868}$$

يمكننا من المعلومات السابقة عمل الجدول الذي نحصل منه على $\frac{1}{\alpha}$ كدالة للسرعة v على النحو التالي:

| v (Km/h) | <35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| f (Kgs) | 3900 | 2540 | 1710 | 1320 | 960 | 760 |
| (F ₁ — 10 CW) | | 240 | | | | |
| F ₂ | 3660 | 2300 | 1470 | 1080 | 720 | 520 |
| a | 1.96 | 1.32 | 0.787 | 0.578 | 0.386 | 0.279 |
| l | 0.511 | 0.812 | 27 | 1.732 | 2.6 | 3.59 |
| a | | | | | | |



شكل (١١ - ٧)

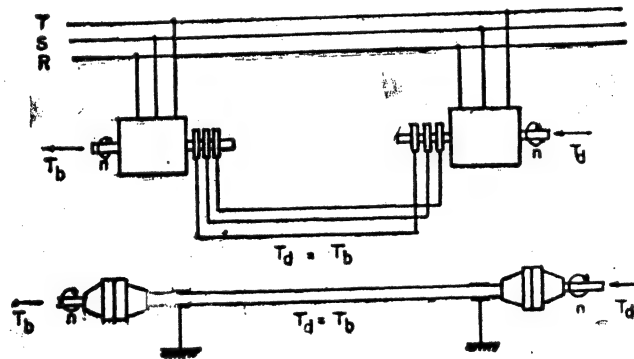
يمكن بعد ذلك رسم المنحنى الذى يربط بين السرعة ومعكوس العجلة - كما فعلنا فى شكل (٧ - ٧) الخاص بالمثال السابق ومتابعة الحل على نفس المنوال، ويبين شكل (٧ - ١١) منحنى السرعة مع الزمن المناظر لشكل (٧ - ٨) فى المثال المذكور.

(ثانياً) عمود الإدارة الكهربى (توصيلات التزامن الذاتى)

Electrical Shaft (Selsyn or selfsynchronous connections)

(٧ - ٩) تكوين عمود الإدارة الكهربى :

يطلق اسم عمود الإدارة الكهربى على مجموعة مكونة من محركين تأثيريين من ذرات الحلقات الانزلاقية ، تتصل حلقاتها الانزلاقية معاً ، ويوصل عضواهما الثابتان على التوازى معاً على نفس اليزبرع ، كما هو مبين فى شكل (٧ - ١٢) . وتستخدم المجموعه على هذا النحو فى نقل عزم دوران ميكانيكى



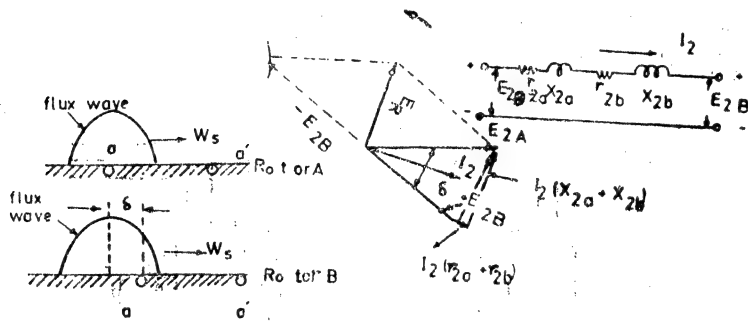
شكل (٧ - ١٢) ١

معين T_d عند سرعة معينة n (قدرة معينة) من مكان ، إلى مكان آخر بعيد بعداً يصعب معه استخدام عمود إدارة ميكانيكى عادى [مبين فى الجزء الأسفل من شكل (٧ - ١٢) ١] ، وذلك بنفس السرعة n بالضبط. ويكون عزم الدوران المنقول T_b مساوياً لعزم الدوران الأصيل T_d ، إذا أهملنا مفقودات القدرة فى خلال عملية النقل.

ويطلق على توصيل المحركين بهذا الشكل اسم توصيل التزامن الذاتى ،

حيث تكون القدرة التي تسرى بين العضوين الدائرين للمحركين عبارة عن قدرة تزامن ، مثل القدرة التي تسرى بين متتجى مولدين متزامنين متصلين على التوازي (كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربائية صفحة ١٩٠).

عندما يكون العضوان الثابتان للمحركين متصلين مع نفس الينبوع يتولد نفس المجال المغناطيسي الدائر في كل من المحركين ، الذي يدور بسرعة التزامن الزاوية ω_s ، كما هو مبين بموجتي المجال في شكل (١٢ - ٧) ب .



شكل (١٢ - ٧) ب

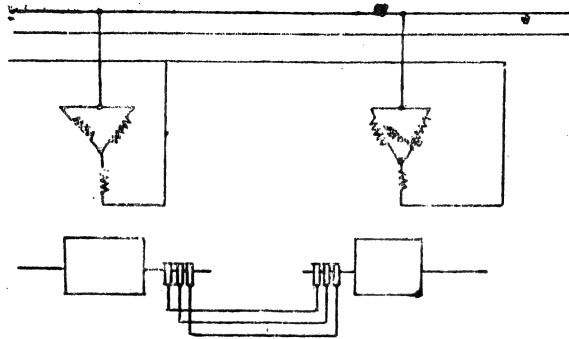
إذا لم يكن هناك أى عزم دوران دخیل على أى من عمودى الإدارة في المحركين، فإنها يدوران بنفس السرعة وتكون القوة الدافعة الكهربائية المرحلية متساوية تماماً في كل من العضوين الدائرين (نظراً للتأثر الكامل بين المحركين) ولنرمز لها بالرمز E_{2A} في المحرك الايمن ، وبالرمز E_{2B} في المحرك الايسر ، بحيث تصبح الدائرة المكافئة للعضوين الدائرين لكل مرحلة وهما متصلان بالتضاد معاً ، كما هو مبين في شكل (١٢ - ٧) ب .

عند دخول عزم الدوران المحرك T_d على عمود إدارة المحرك الايمن بالسرعة n ، ووجود عزم الدوران القرملى T_b على عمود إدارة المحرك الآخر ، يصبح العضو الدائر في هذا المحرك الاخير دائراً بالسرعة n أيضاً ،

بحكم التماثل بين المحركين ، ولكن E_{2A} يكون متقدماً على E_{2B} بالزاوية δ كما هو مبين في شكل (١٢ - ٧) ب ، على أساس أن عمود الادارة الايمن عليه عزم دوران محرك وعمود الادارة الايسر عليه عزم دوران فرملي (كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربائية صفحة ١٩١) ، وبصبح الوضع بالنسبة لدائرتي العضوين الدائرين ، كما لو كان علي الناحية اليمنى مولد متزامن ، يغذى علي الناحية اليسرى محركاً متزامناً ، وسرعة التزامن لهما هي n ، التي يتحتم عليها أن يدورا بها معاً دون تغيير . على هذا النحو ينتقل عزم دوران معين عند سرعة معلومة ، من عمود ادارة المحرك الايمن الي عمود ادارة المحرك الايسر ، عن طريق سريان قدرة تزامن بين دائرتي العضوين الدائرين للمحركين .

من الواضح أنه عندما يكون التردد واحداً في دائرتي العضوين الدائرين ، وعضواهما الثابتان متصلين إلى نفس الينبوع ، فإن السرعة تكون واحدة بالضبط في كل من المحركين ، وهذا هو عين المطلوب . ويكون سريان القدرة في هذه الحالة ، من ناحية إلى الناحية الأخرى ، عن طريق القدرة الانزلاقية (slip power) ، التي تسري بين دائرتي العضوين الدائرين . لذلك فإنه عند سرعة التزامن n_s حيث تكون الضغوط والتيارات في دائرتي العضوين الدائرين مساوية للصفر ، لا يمكن نقل أية قدرة ، وتفشل المجموعة في أداء مهمتها .

وللتغلب علي هذه الصعوبة ، نعمل الي ادارة العضو الدائر للمحرك المدار (عزم الدوران T_a) في عكس اتجاه دوران مجاله المنطاطيسي ، حيث يمكن في هذه الحالة نقل القدرة عند سرعة التزامن n_s . وإذا أردنا نقل القدرة في كل من اتجاهي الدوران المتضادين ، فإننا نستخدم التوصيل مفرد المرحلة ، كما هو مبين في شكل (١٣ - ٧) .



شكل (١٣ - ٧)

(٧-١٠) سريان القدرة في عمود الادارة الكهربى ثلاثى المراحل :

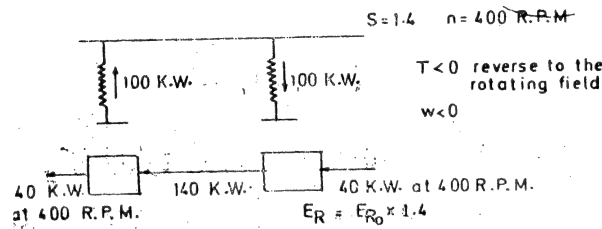
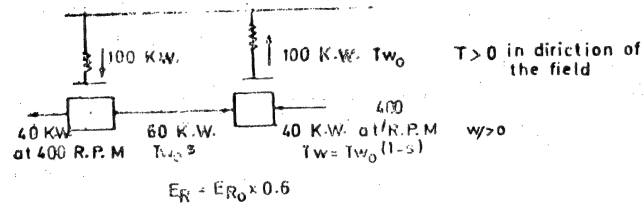
نقراض أننا نريد نقل قدرة مقدارها ٤٠ كيلوات وعند السرعة ٤٠٠ لفة في الدقيقة من مكان الى مكان آخر بعيد عنه ، بحيث يستحيل استخدام عمود ادارة ميكانيكى فى هذه الحالة . نحتاج إذا الى عمود ادارة كهربى ، وهو عبارة عن محركين تأثيرين ذواتا حلقات انزلافية متماثلين تماما من جميع النواحي بحيث يكون توصيلهما كما سبق شرحه فى البند السابق ، وكما هو مبين فى شكل (١٢ - ٧) ويكون وضع المحرك الأول فى مكان القدرة المراد نقلها ، بحيث تقوم القدرة المراد نقلها بادارة عضوه الدائر عند السرعة المطلوبة ، إما فى اتجاه دوران مجاله المغناطيسى ، أو فى عكس اتجاه دورانه على حسب الأحوال (يتم عكس اتجاه دوران المجال المغناطيسى بتبديل توصيل خطين إلى اليذوع) ويكون وضع المحرك الثانى فى المكان المراد نقل القدرة اليه بحيث يوصل عمود إدارته إلى الجهاز المستهلك للقدرة عند نفس السرعة المطلوبة .

يبين شكل (١٤ - ٧) توزيعات القدرة فى كل من اتجاهى الدوران ،

عندما يكون تردد اليذبوع ٥ ذبذبة في الثانية وعدد أقطاب كل من المحركين ستة ، وذلك مع اهمال المفقودات.

Power flow of the 3-phase electrical shaft: (Losses are neglected)

$$S = 0.6 \quad n = 400 \quad n_s = 1000 \quad f_1 = 50$$



شكل (١٤ - ٧)

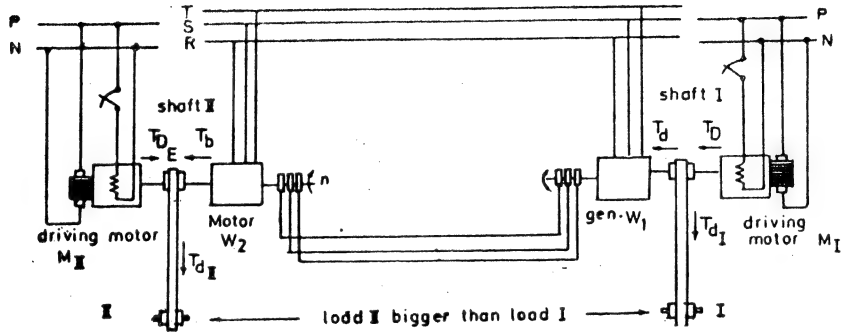
هذا ونظراً لأن عمود الإدارة الكهربى عبارة عن مجموعة مترامنة في الواقع ، فانها يمكن أن تتعرض للاهتزازات أو التآرجح ، شأنها في ذلك شأن الآلات المترامنة (صفحة ٢٥٨ من كتاب نظريات وتصميم الآلات الكهربائية) وتحدث هذه الاهتزازات فعلاً ، وخاصة عندما يكون الدوران في عكس اتجاه دوران المجال المغناطيسى . ويكون فعل التخميد الميكانيكى كافياً عادة لعدم تسبب هذه الاهتزازات في الازعاج.

(١١ - ٧) عمود الادارة الكهربى المعوض:

(The compensating electrical shaft)

الغرض الاساسى من عمود الادارة الكهربى في هذه الحالة ، كما هو مبين

في شكل (١٥-٧) ، جعل عمودي الإدارة I و II يدوران دائماً عند نفس السرعة بالضبط ، في حين انها مختلفا التحميل ، ويقوم بإدارتها محركان M_{II} ، M_I محملين بالتساوي .



شكل (١٥-٧)

يملك محركا الإدارة (driving motors) M_I M_{II} منحني عزم دوران مع السرعة متماثلين تماماً . ونظراً لأن عمود الإدارة الكهربائي يجعل عمودي الإدارة I ، II يدوران بنفس السرعة دائماً ، فإن عزم دوران الإدارة I ، II لكل من محركي الإدارة يكون واحداً ، فيصبح هذان المحركان محملين بالتساوي طوال الوقت .

إذا فرضنا أن عمود الإدارة I يحمل بعزم الدوران T_{dI} ، وعمود الإدارة II بعزم الدوران T_{dII} ، وأن هذا الأخير أكبر من الأول ، نحصل على العلاقات الآتية (راجع شكل (١٥-٧) :

$$T_D = T_{dI} + T_d \rightarrow \text{for shaft I}$$

$$T_D = T_{dII} - T_b \rightarrow \text{for shaft II}$$

$$\therefore T_{dII} - T_{dI} = (T_d + T_b)$$

(١٨-٧)

وهذا يعنى أن الفرق بين عزى دوران التحميل على الجانبين I , II يكون دائماً مساوياً لمجموع عزى دوران المدخل والمخرج لعمود الادارة الكهربى . وفى حالة تساوى هذين الاخيرين ، عند اهمال المنقودات ، يصبح الفرق مساوياً لضعف أحدهما . وهذه حقيقة على جانب كبير من الاهمية ، بالنسبة لتحديد قيمة النهاية العظمى للفرق بين عزى الدوران ، الذى يمكن لعمود الادارة الكهربى أن يعوضه عند نفس السرعة . وتتأثر قيمة النهاية العظمى هذه بطبيعة اتجاه دوران عمود الادارة الكهربى ، هل هو فى اتجاه دوران المجال المغناطيسى ، أو عكسه ، حيث يمكن الحصول على قيمة أكبر للنهاية العظمى للفرق ، عندما يكون الدوران فى عكس اتجاه المجال المغناطيسى .

كذلك تختلف ظروف تحميل محركى الادارة M_I و M_{II} على حسب اتجاه الدوران بالنسبة لاتجاه دوران المجال المغناطيسى ، فعندما يكون الاتجاهين متماثلين يأخذ عمود الادارة الكهربى نصيبه من الحمل مخففاً اياه عن محركى الادارة ، وعندما يكون الاتجاهان متضادين يصبح عمود الادارة الكهربى محملاً على محركى الادارة ، مما يزيد من عبئها . ويتضح ذلك من العلاقات الآتية:

عندما يكون الدوران فى نفس الاتجاه:

$$T_D = \frac{1}{2} (T_{aI} + T_{aII}) - \frac{1}{2} (T_I - T_a) \quad (٧-١٩)$$

عندما يكون الدوران فى اتجاهين متضادين:

$$T_D = \frac{1}{2} (T_{aI} + T_{aII}) + \frac{1}{2} (T_a - T_b) \quad (٧-٢٠)$$

مثال محلول (١) :

Explain briefly with the aid of a neat sketch the function of a compensating electrical shaft. Write down the torque equations relating the driving motor torques, and the load torques to be compensated, for both directions of the rotating field in the induction motors.

In a compensating electrical shaft arrangement the driving machines are two identical D.C. shunt motors, which have both the following torque speed characteristic:

| | | | | |
|----------------|-----|-----|-----|-----|
| Torque (Kg.m.) | 125 | 105 | 80 | 50 |
| Speed (r.p.m.) | 800 | 850 | 900 | 950 |

The induction motors are 4-pole machines connected to the same 50 Hz supply, with their rotors running in the direction of the magnetic fields. The load torques to be compensated are 90 and 110 Kg.m. at a speed of 825 r.p.m. Find the ratings of induction motors, neglecting all losses.

الجزء النظري من السؤال يحل بمراجعة المعلومات المعطاة سابقاً

بالرجوع إلى منحنى عزم الدوران مع السرعة لسكل من محركات الإدارة نجد أن عزم دوران الإدارة T_D لكل منها ، عند سرعة الدوران المعطاة ٨٢٥ لفة في الدقيقة ، هو ١١٥ كيلوجرام . متر . وبإهمال المفقودات نجد أن :

$$\text{For shaft I : } T_D = T_{d1} + T_{d2}$$

For shaft II : $T_D = T_{dII} - T_b$

$$\therefore T_d = T_D - T_{dI} = 115 - 90 = 25 \text{ Kg.m.}$$

$$T_b = T_{dII} - T_D = 145 - 115 = 25 \text{ Kg.m.}$$

$$n_s = \frac{3000}{2} = 1500 \text{ r.p.m.}, \quad S = \frac{1500 - 825}{1500} = 0.45$$

$$P_m = T\omega = \frac{25 \times 9.81}{1000} \times \frac{2\pi \times 825}{60} = 21.2 \text{ KW}$$

$$\text{input } P_i = \frac{P_m}{1 - S} = \frac{21.2}{0.55} = 39.5 \text{ KW}$$

مثال محلول (٢):

Explain briefly with the aid of a connection diagram how an electrical shaft is used to transmit a certain amount of power at exactly the same speed.

Consider the case of transmitting a torque of 70.75 Kg.m. at a speed of 825 r.p.m. using two identical induction motors with 4 poles each and their stators connected to 50 HZ supply, for both cases of rotation in and against the direction of the field, and show the flow of power in the stators and rotors of both machines.

الجزء النظري من السؤال يحل بمراجعة المعلومات السابقة

(أولاً) عندما يكون اتجاه دوران العضو الدائر في اتجاه دوران المجال المغناطيسي:

$$n_s = \frac{3000}{2} = 1500 \text{ r.p.m.}, s = \frac{1500 - 825}{1500} = 0.45$$

$$\omega = \frac{2\pi \times 825}{60} = 86.3 \text{ radian/sec}$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi \times 1500}{60} = 157 \text{ radian/sec}$$

بالنسبة للمحرك المدار ، فإن القدرة الداخلة على عمود إدارته P_{mi} عبارة عن:

$$P_{mi} = T\omega = 70.75 \times \frac{9.81}{1000} \times 86.3 = 60 \text{ KW}$$

والقدرة في دائرة العضو الدائر P_{cu2} ، وهي التي تسرى من دائرة العضو الدائر في محرك الادارة علي الناحية الأخرى ، عبارة عن:

$$P_{cu2} = s P_g = s T\omega_0 = 0.45 \times 70.75 \times \frac{9.81}{1000}$$

$$\times 157 = 9.1 \text{ KW}$$

وتكون القدرة الداخلة في الينبوع على هذه الناحية P_{gi} عبارة عن:

$$P_{gi} = T\omega_0 = P_{gi} = 70.75 \times \frac{9.81}{1000} \times 157 = 109.1 \text{ KW}$$

$$\text{Check } P_{gi} = P_{mi} + P_{cus} = 60 + 49.1 = 109.1 \text{ KW}$$

بالنسبة لمحرك الادارة :

القدرة التي تسرى من دائرة عضوه الدائر P_{cu2} ، كما وجدناها سابقاً ، عبارة عن:

$$P_{cu2} = 49.1 \text{ KW} = s T \omega_0$$

القدرة الخارجة على عمود الادارة P_{mo} عبارة عن:

$$P_{mo} = \frac{(1-s)}{s} P_{cu2} = \frac{0.55}{0.45} \times 49.1 = 60 \text{ KW}, n = 825 \text{ r.p.m.}$$

القدرة الداخلة من الينبوع لادارة المحرك P_{so} عبارة عن:

$$P_{so} = P_{go} = \frac{P_{mo}}{(1-s)} = \frac{60}{0.55} = 109.1 \text{ KW}$$

$$\text{check : } P_{go} = P_{mo} + P_{cu2}, 109.1 = 60 + 49.1 \text{ KW}$$

(ثانيا) عندما يكون اتجاه دوران العضو الدائر في عكس اتجاه دوران

المجال المغناطيسي:

$$n = -825 \text{ r.p.m.}, s = \frac{1500 + 825}{1500} = 1.55$$

$$\omega = 86.8 \text{ radian/sec}, \omega_0 = 157 \text{ radian/sec}$$

بالنسبة للمحرك المدار : فان القدرة الداخلة على عمود ادارته P_{mi} هي

٦٠ كيلووات والقدرة الداخلة من الينبوع للمساعدة على إدارة المحرك في

عكس اتجاه دوران المجال المغناطيسي هي P_{so} عبارة عن :

$$P_{so} = P_{go} = T \omega_0 = 109.1 \text{ KW}$$

$$= \frac{P_{mi}}{1-s} = \frac{60}{0.55} = 109.1 \text{ KW}$$

القدرة التي تسرى من دائرة عضوه الدائر P_{cu2} إلى العضو الدائر في محرك الادارة عبارة عن :

$$P_{cu2} = T\omega_0 s = 70.75 \times 157 \times 1.55 = 169.1 \text{ KW}$$

بالنسبة لمحرك الادارة : القدرة التي تسرى في دائرة عضوه الدائر : كما وجدناها سابقا عبارة عن :

$$P_{cu2} = 169.1 \text{ KW}$$

القدرة الداخلة في النوع P_i عبارة عن :

$$P_{i1} = T\omega_0 = 102.1 \text{ KW}$$

القدرة المعطاة على عمود الادارة عند السرعة ٨٢٥ لفة في الدقيقة عبارة عن :

$$P_{mo} = \frac{1-s}{s} P_{cu2} = \frac{0.55}{1.55} \times 169.1 = 60 \text{ KW}$$

(ثالثا) المحركات التآثيرية الخطية

Linear Induction Motors

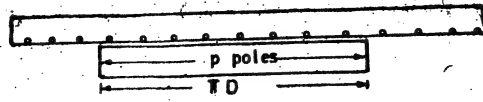
(١٢-٧) منشأ المحركات الخطية :

لقد كان الاهتمام بوسائل الجر الكهربى (Electric Traction) ناشئا في البداية بسبب الحاجة إلى وسائل مواصلات أكثر سرعة وأقل تكلفة واحتياجا إلى الصيانة من وسائل النقل بالآلات الحرارية المتاحة . وكان لمحرك التيار المستمر دور كبير في هذا المضمار ، يتلوه في ذلك المحركات التآثيرية . ومحرك التيار المستمر يفضل المحرك التآثيرى من حيث سهولة التحكم في

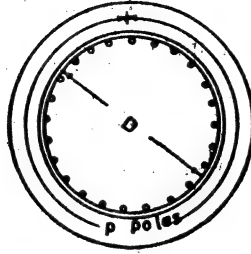
سرعته ، ولا يعيبه سوى احتوائه على المبدل ، الذى بعد من أعقد الأجزاء
تركيباً فى الآلات الكهربائية وأكثرها حاجة إلى الصيانة والرعاية .

ولكن نظراً لأن سرعة المحركات الكهربائية تكون محدودة بسبب
اعتبارات التصميم ، التى تتعلق بمقادير القوى المركزية الطاردة
(Centrifugal Forces) المؤثرة على الملفات الرائدة فى المحارى (هندسة الآلات
الكهربية صفحة ٥٤٨ و ٥٤٩ ونظريات وتصميم الآلات الكهربائية صفحة ٢٩٣
و ٢٩٤) ، فقد ظلت الحاجة ملحة إلى استخدام صندوق روس (Gear Box)
لنقل الحركة من عمود إدارة المحرك الكهربى إلى عمود إدارة العجل فى وسيلة
النقل ، بسرعات قد تكون أعلى كثيراً من سرعة المحرك نفسه . ومع ذلك
فقد ظلت السرعات ، التى يمكن الحصول عليها بهذه الوسيلة ، أقل كثيراً من
مستلزمات التطور فى تكنولوجيا العصر الحديث ، بسبب الاجتهادات
الميكانيكية غير المحتملة بالنسبة لصندوق التروس ، والتآكل القطيع الذى يمكن
أن يعانیه ، اذا زادت السرعة عن حد معلوم .

عند ذلك شئت فذكره استخدام محركات كهربية ، لدفع وسيلة النقل فى
محراها مباشرة بالسرعات الكبيرة المطلوبة ، دون الحاجة الى وسيط . ولم يكن
فى هذه الفكرة أية علة ، نظراً لأنهم درسوا الملفات على المحرك
الكهربى تكون دائماً على سطح ممرود . هذا يوحى بأن أية آلة كهربية
دوارة يمكن انتاجها على صورة آلة خطية باستخدام رقائق حديد مستطيلة ،
بدلاً من الرقائق المستديرة ، توضع فى مجاريها أنواع مشابهة من الملفات .
وتحمل القوة والعجلة الخطية ، فى هذه الحالة ، محل عزم الدوران والعجلة
الدائرية فى المحرك الدوار . ويبين شكل (١٦ - ٧) ا منظر المحرك الخطى
بالمقارنة مع المحرك العادى المبين فى ب من نفس الشكل .



.١.



ب.

شكل (١٦ - ٧)

هذا وتوجد محركات خطية من أنواع مختلفة (تأثيرية ومستمرة ومتزامنة .. الخ)، نختص منها بالذكر هنا المحركات التأثيرية الخطية فقط .

(١٣ - ٧) المجال المغناطيسي السيار

(Travelling magnetic field)

عند مرور تيارات مترنة ثلاثية المراحل في ملفات ثلاثية المراحل ، ينشأ مجال مغناطيسي دائري ، كما سبق بيانه في مواطن كثيرة . ويكون منحني القوة الدافعة الكهربائية ، وكذلك منحني كثافة الخطوط المغناطيسية ، موزعا على شكل جيبى حول الثغرة الهوائية ، كما تنص على ذلك المعادلة (١ - ٣) . وتكون سرعة دوران المجال المغناطيسي هي سرعة التزامن n_s ، كما أن السرعة المحيطية v_s لهذا المجال تتحدد بناء على ذلك بالقيمة :

$$v_s = \frac{\pi D n_s}{60} = \frac{\pi p \tau_p n_s}{\pi 60} = 2 f \tau_p \quad (٧-٢١)$$

حيث p هو عدد الأقطاب الكلى ، بدلا من $2p$ في المحرك المعتاد .

من الواضح أننا نحصل على المحرك الخطى ، المبين في شكل (١٦-٧) أ من المحرك الدوار ، المبين في شكل (١٦-٧) ب ، بقطع هذا الأخير في العضو الثابت والعضو الدائر في اتجاه نصف قطري ، ثم فرده فيكون الجزء العلوى في (أ) هو العضو الدائر المفرد ، ويكون الجزء السفلى هو العضو الثابت المفرد . وفي هذه الحالة يصبح المجال المغناطيسي الدائر سائراً في الثغرة الهوائية بين الجزئين ويطلق عليه اسم المجال المغناطيسي السيار ، وتكون سرعته الخطية هي نفس السرعة المحيطية المعطاة بالمعادلة (٧-٢١) ، وهي سرعة التزامن بالنسبة للمحرك الخطى .

ويلاحظ أننا نستطيع الآن تحديد بداية ونهاية لكل من نوعي الملفات في المحرك الخطى ، بينما كانت هذه الملفات ذات صفة مستمرة في المحرك المعتاد ، بسبب وجودها على محيط دائرة ، وهو مالا أول له ولا نهاية . ويقتضي الأمر ، بالنسبة للمحرك الخطى في هذه الحالة ، أن يكون أحد جزئه ممتداً بحيث يتحرك عليه الجزء الآخر مع المجال المغناطيسي السيار ، لكي تتم الصورة على أساس مماثل للمحرك المعتاد .

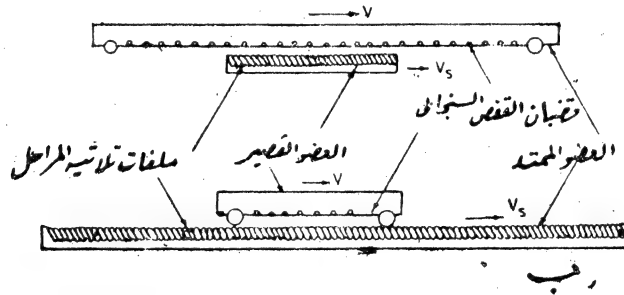
(٧-١٤) المحرك الخطى ذو العضو الثابت القصير والمحرك ذو العضو

الدائر القصير :

(Short stator and short rotor linear induction motors)

قد يكون الجزء الممتد في المحرك الخطى هو المقابل للعضو الدائر في المحرك المعتاد فيطلق عليه اسم المحرك الخطى ذي العضو الثابت القصير ،

وقد يكون الجزء الممتد هو المقابل للعضو الثابت ، فيطلق عليه اسم المحرك الخطي ذى العضو الدائر القصير . وفي الحالة الأولى توضع الملفات ثلاثية المراحل ، التي توصل الى الينبوع ثلاثى المراحل ، على العضو الثابت القصير ، ويكون العضو الممتد مكونا من قضبان ، مناظراً لنوع القفص السنجاني فى بي المحركات المعتادة ، كما هو مبين فى شكل (١٧-٧) . ويراعى أن



(شكل ١٧-٧)

يكون العضو القصير مغطى فى خلال الحركة دائماً بقضبان القفص السنجاني .

وتوزع الملفات ثلاثية المراحل على العضو الثابت الممتد فى الحالة الثانية ، بينما يكون العضو القصير من نوع القفص السنجاني ، كما هو مبين فى شكل (٧-٧) ب . ومن البديهي أن هذا النوع يستخدم فى الحالات التي يكون فيها العضو الممتد ذا طول محدود ، أى عندما تكون الحركة على المدى القصير . ويراعى أن تظل الملفات فى خلال الحركة مغطاة دائماً بقضبان القفص السنجاني على العضو القصير .

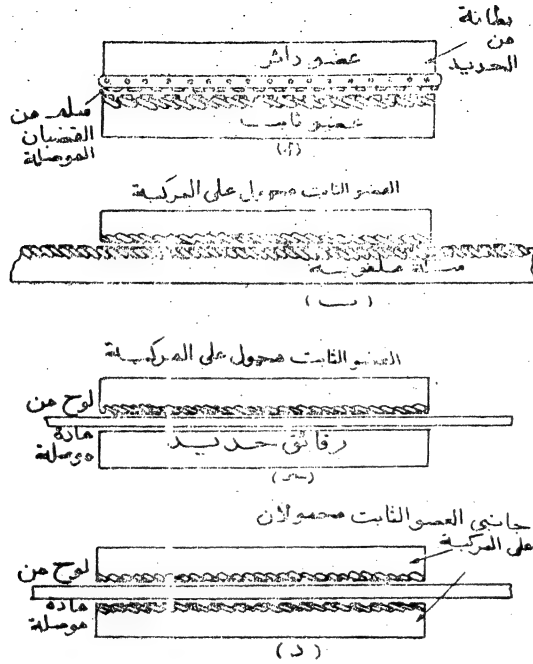
ونظراً لأن الحركة بين العضوين تكون نسبية ، بصرف النظر عن أن يكون أى العضوين هو المتحرك والآخر هو الثابت ، كما هى الحال بالنسبة

للمحرك المعتاد، فإنه يمكن أن يكون العضو المحتوى على قضبان القفص السنجاني في كل من أ، ب (شكل ١٧ - ٧) هو الجزء المتحرك في الحالتين.

هذا، وقد ذكرنا أن أحد العضوين، وهو الممتد في شكل (١٧-٧) أ، يتكون من قضبان على نمط القفص السنجاني في المحركات المعتادة، وقد كان ذلك من قبيل التشبيه، ولتقريب الحقائق من ذهن القارئ، وفي الحقيقة أن مثل هذا العضو يصنع عادة من ألواح ممتدة من الألومنيوم (على أساس أنه أرخص تكلفة من النحاس) ويوجد حالياً بعض الاتجاهات لصنع العضو الممتد من ألواح الحديد (سبائك خاصة ذات معامل مقاومة محدود يقدر بحوالى 10×8 أوم متر مربع / متر بالمقارنة بحوالى 10×8 أوم متر مربع / متر للنحاس)، والغرض من ذلك هو رخص التكاليف، إلى جانب الحصول على مسار ذى معاوقة مغناطيسية صغيرة لمخطوط المجال المغناطيسى، مما يقلل من تيار المغطسة، ويعمل على تحسين معامل القدرة.

(١٥-٧) العضو الثابت مزدوج الجانبين :

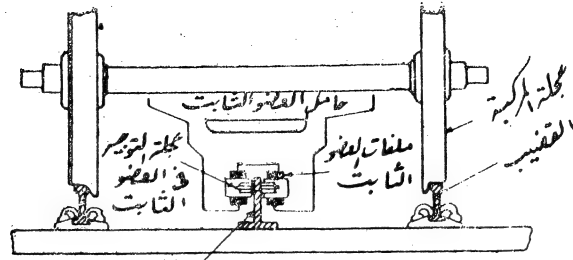
يبين شكل (١٨ - ٧) طريقة تطور المحرك المعتاد حتى نصل إلى المحرك ذى العضو الثابت مزدوج الجانبين. الجزء أ يبين المحرك الخطى المناظر للمحرك المعتاد، كما حصلنا عليه في البداية، حيث يكون العضو الثابت ملفوفاً، ويكون العضو الدائر عبارة عن نظير القفص السنجاني، وهو في هذه الحالة على شكل سلم من القضبان الموصلة (Conducting ladder) ذى بطانة من الحديد لتكملة الدائرة المغناطيسية. الجزء ب يبين كيف يمكن أن يتطور ذلك، فتصبح السكة نفسها ملفوفة، وهو أمر غير عملي لما يتكلفه ذلك من نفقات باهظة. وهذا يؤدي إلى التطور المين في الجزء (ج) حيث تصبح السكة عبارة عن لوح من مادة موصلة، كما سبق ذكره في البند السابق، مع وجود نظير للعضو الثابت من الناحية الأخرى، ولكنه عبارة عن مجرد رقائق من الحديد لتكملة الدائرة المغناطيسية. الجزء د يبين كيف يصبح المحرك ذا عضو



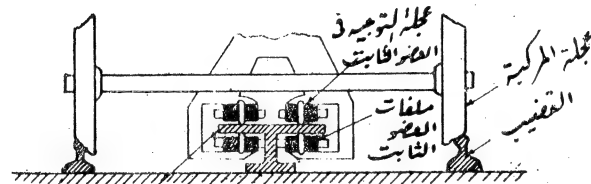
شكل (٧-١٨)

ثابت مزدوج الجانبين بعد لف هذا الرقائق بملفات مائلة للمفات العضو الثابت، وذلك للاستفادة بها كهربياً، الى جانب الاستفادة من وجودها مغناطيسياً.

يبين شكل (٧-١٩) كيف يكون العضو الثابت مزدوج الجانبين محمولا على المركبة، لكي يسير بجذء السكة المكونة من ألواح موصلة، وذلك عندما تكون هذه الألواح في وضع رأسي، كما في الجزء أ، وعندما تكون الألواح في وضع افقي، كما في الجزء ب.



أ. اسكة من الألواح الرأسية



ب. اسكة من الألواح الأفقية

شكل (١٩-٧)

(٧-١٦) بعض المبادئ الأساسية الخاصة بالحركات التأثيرية الخطية :

تبين المعادلة (٧-٢١)، التي حصلنا عليها في بند (٧-١٣)، سرعة التزامن الخطية للمحرك بدلالة التردد والخطوة القطبية. ويمكن أن يكون عدد الاقطاب في المحرك الخطي فردياً أو زوجياً، ولذلك رمزنا إليه في هذه المعادلة بالرمز p ، بدلا من $2p$ كما كنا نفعل مع المحرك المعتاد. هذا ويكون الابتدائي في المحرك الخطي هو العضو الذي يوصل إلى الينبوع، والثانوي هو العضو الآخر، ويمكن أن يكون أي منها هو العضو الثابت. وهناك ثلاثه أنواع مميزة من الحركات الخطية وهي: (١) آلة القوة، وهي خاصة بانتاج قوة دفع في حالة السكون، أو عند سرعه منخفضة على مدى مسافة

قصيرة ، وتصنع بأحجام صغيرة . (٢) آلة الطاقة ، وهي خاصة بإعطاء طاقة حركة لكتلة بتعجيلها من السكون الى سرعة عالية على مدى مسافة معينة .
(٣) آلة القدرة ، وهي خاصة بنقل الكتلة ، عند سرعات عالية في العادة ، وبمعامل كفاءة قدرة عالي نسبياً .

يكون طول الموجه λ في المحرك الخطي عبارة عن ضعف طول الخطوة القطبية $2 \tau_p$ ، ولذلك نجد أنه عندما يكون طول الموجه متر واحد والتردد ٥٠ ذبذبة في الثانية ، فإنه تطبيقاً للمعادلة (٢١-٧) تكون سرعة التزامن عبارة عن :

$$v_s = \lambda f = 2 \tau_p f = 1 \times 50 = 50 \text{ m/sec}$$

$$= 50 \times \frac{1}{1000} \times 3600 = 180 \text{ Km/h}$$

وهذا يعني أن سرعة النقل بآلات القدرة تكون عالية . وهذه هي سرعة المجال المغناطيسي للعضو الثابت ، أما سرعة العضو الآخر v وهو الذي يطلق عليه اسم الجارى (runner) في هذه الحالة ، فهي ترتبط مع سرعة التزامن ومعامل الإنزلاق s بنفس العلاقة كما في المحرك المعتاد ، أى أن :

$$v = v_s (1 - S) \quad (٢٢-٧)$$

ويكون تقسيم القدرة المنقولة عبر الثغرة الهوائية P_g الى قدرة ميكانيكية P_m ، ومفقودات نحاسية في ملفات العضو الدائر P_{cu2} ، بنفس النسبة كما في المحرك المعتاد أى $1 : (1-S) : S$

يختلف المحرك الخطي عن المحرك المعتاد من ناحيتين رئيسيتين : (أولاً) أن تيار المغنطة في المحرك الخطي يكون اكبر كثيراً بسبب وجود ثغرة هوائية

كبيرة و (ثانياً) أن معالم المحرك الخطي تختص طبيعتها بعدم الاستمرار ، مما يؤدي الى تشوهات في منحنى توزيع المجال المغناطيسي ومفقودات طرفية (edge losses) . هذا ويمكن إستنتاج خواص التشغيل للمحرك الخطي على أساس دائرة مكافئة تشبه في تكوينها دائرة المحرك المعتاد المكافئة ، ويكون استنباط ثوابت هذه الدائرة بالطرق التي استخدمها ليزويت (مراجع رقم ٢٢) .

مسائل متنوعه

1. A 6-pole induction motor is supplied by an 8-pole alternator running at 750. r.p.m. If the motor slip is 3% what is its actual speed

2. If an 8-pole induction motor running from a supply of 50 c/s has an e.m.f. in the rotor of frequency 1.5 c/s. determine (i) the speed of the motor, (ii) the slip.

3. A 3-phase 50 c/s induction Motor with its rotor star connected gives 10. volts root square at standstill between slip rings at open circuit. Calculate the current in each phase of the rotor winding when joined to a star connected load each limb of which has a resistance of 10 ohm and reactance of 10 ohm. The resistance/phase of the rotor winding is 0.2 ohm, and its reactance at standstill is 10 ohm. Calculate the current in each rotor phase when the slip rings are short circuited and the motor is running with a slip of 5 %.

4. A 500 volt, 50 c/s, 3-phase I.M. (induction motor) develops 20 H.P. inclusive of mechanical losses when running at 985 r.p.m. the power factor being 0.87. Calculate (a) the slip (b) the rotor copper losses (c) The total output if the stator losses are 1500 watts, (d) the line current (e) number of cycles per minute of the rotor E.M.F.

5. 3-phase I.M. has synchronous speed of 250 r.p.m. and a 4% slip at full-load. The rotor has a resistance of 0.02 ohm per phase and a standstill leakage reactance of 0.15 ohm/phase. Calculate (a) The speed at which maximum torque is developed, (b) The ratio of maximum to full-load torque.

6. A 35 H.P., 4-pole, 50 c/s, I.M. has its full load torque at a slip of 2%. The maximum torque = 2.5 full load torque. Find the relation between the torque and slip. Draw the torque-slip characteristic.

7. An I.M. has a rotor reactance/phase at standstill of 0.3 ohm. plot curves of torque as o/o ge. of maximum torque to a base of slip for constant rotor resistance :

a) 0.08 Ohm b) 0.8 Ohm. respectively:

Plot curves of rotor current, if the standstill voltage is 300 volts/phase. The frequency of the supply remains constant.

8. I.M. carries a rotor current per phase of 10 amps., when the slip = 5%. If the rotor effective resistance is 0.1 ohm/ph. determine the internal power developed/ph., the copper losses and the rotor input.

9. A squirrel cage I.M. has two rotor cages, one with an effective resistance and standstill reactance 0.6 and 0.8 respectively. The other rotor cage has an effective resistance and standstill reactance of 0.3 and 3 ohms respectively. Plot curves of torque due to each winding and the total torque on a base of slip.

10. A 3 phase squirrel cage I.M. rated 2 KW, 500 V, 50 cycles with 4 poles gave the following load readings at 500 V.

| Load (approx) | 4/4 | 3/4 | 1/2 | 1/4 |
|---------------|-----|------|------|------|
| Pi KWS | 105 | 79.5 | 52.5 | 26.3 |
| Ii Amqs | 143 | 107 | 75 | 49 |
| Slip % | 3.4 | 2.55 | 1.7 | 0.85 |

Resistance measured at 20°C between stator terminals = 0.118 ohm .

411

Friction and windage losses = 1.3 KW, Iron losses = 1.9 KW.

Calculate and draw for a temp. of stator winding 75°C the characteristics of the motor, i.e. current, efficiency and output as functions of the input. (L.U.).

11. A 3 phase, 6 pole induction motor is supplied from 50 c/s supply. The slip ring rotor is star connected and has an induced E.M.F of 110 V between slip rings at standstill on open circuit with the normal voltage applied to the stator. The resistance and standstill reactance of each rotor phase are 0.1 and 0.9 ohm respectively. The Full load speed is 960 r.p.m. Calculate for full load :

- (a) the rotor copper losses.
- (b) the total mechanical power developed.
- (c) the torque in kg.m.
- (d) the maximum torque in kg.m. and the slip at which it occurs. Neglect stator drop. (Stator to rotor turns ratio is 2).

12. Derive the relationships between power output, rotor losses and speed in an induction motor.

A 6-pole, 400-volt, 3-phase, 50-c/s induction motor has a star-connected stator having a resistance of 0.08 ohm/phase. When the motor is running unloaded, the input is 1.2 kw, of which 0.4 kw, is friction and windage loss. (Neglect copper loss.) Calculate (a) the rotor copper loss and (b) the horsepower output of the motor when running at 940 r.p.m. and taking an input of 42 kw at 0.85 power factor. (L.U.)

13. Explain the relationships between the power output,

446

speed and rotor losses in a polyphase induction motor. What is the effect of varying the resistance of the rotor circuit when a given torque is being developed.

A 6-pole induction motor running at 960 r.p.m. on a 400-volt, 3-phase supply of frequency 50 c/s takes a current of 71.5 A at 0.85 power factor. The stator winding, star-connected, has a resistance of 0.0783 ohm/phase. If stator iron loss is 0.8 kw and friction plus windage losses are 0.4 kw total, calculate (a) the output torque at the pulley and (b) the rotor copper loss.

14 The power input to a 500 volt, 50 c/s, 6 pole, 3 phase induction motor running at 975 R.P.M. is 40 K.W. at 0.88 power factor. The stator losses are 1.0 K.W. and the friction and windage losses total 2.0 K.W. Calculate : (a) the slip. (b) the line current, (c) the brake horse power; (d) the rotor copper losses, (e) the efficiency, (f) if the rotor resistance is 0.2 ohm per phase, calculate the external resistance per phase which must be added to lower the speed to 850 R.P.M. with the same full load torque.

15. A 3 phase, 10 pole, star connected induction motor has a final output of 500 H.P when connected to 2200 V, 50c/s supply and runs with a slip of 3%. The stator losses are 7 KW and the mechanical losses are 8 KW. If the power factor is 0.88 find the line current, the full load torque and the speed of the motor.

If the equivalent rotor reactance per phase, referred to the stator, is 2 ohms, find the value of the maximum torque and the approximate value of the speed at which it occurs. Neglect voltage drop on the stator side.

16. A 3-phase 6-pole induction motor running from a 50-c/s supply has an input of 32kw when delivering full-load output. On no-load the input is 1 kw, of which 250 W are windage and friction losses. Copper loss under these conditions may be neglected. On carrying out a locked rotor test with full-load current circulating, the input is 2.5 kw, of which 1.5 kw is stator copper loss. (Iron losses are negligible) Calculate the full-load output and speed. (L.U.)

17. A 4-pole induction motor running from a 50 c/s supply has an input of 32 kw when delivering full-load output, On no-load the input is 1 KW, of which 250 W are windage and friction losses. Copper loss under these conditions may be neglected. On carrying out a locked-rotor test with full-load current circulating, the input is 2.5 kw of which 1.25 kw is stator copper loss. (Iron losses may be neglected under these conditions.) Calculate the full-load sh ft output and speed.(L.U.)

18. Explain briefly of the principle action of a 3-phase induction motor. Distinguish between cage rotor and wound rotor motors and give an account of their operating characteristics.

Neglecting the impedance of the stator winding, derive an expression for the torque developed by the rotor of a 3-phase motor in terms of the slip and the rotor constants when the stator winding is supplied at constant voltage, r.m.s. and frequency. Show that the maximum torque developed is independent of the rotor resistance.

19. A 3-phase induction motor has a rotor resistance per phase of R , and a standstill leakage reactance per phase of X . The phase supply voltage is V . The resistance and leakage

reactance of the stator winding are negligible. If this motor operates at a fractional slip of S and torque developed is T , prove that :

$$T = k.S.V^2 R / (R^2 + S^2 X^2)$$

where k is a constant.

Such a motor, when connected to a 400 - V supply, has a starting torque equal to the full - load torque, and a slip of 4 per cent at full load. If the supply voltage is reduced to 330 V, determine :

- (a) the starting torque in terms of the full - load torque.
- (b) the slip when the motor is rotating and developing full - load torque .

Assume that at full - load slip the leakage reactance of the rotor is small compared with its resistance .

20. Explain, briefly, with the aid of connection diagrams two methods used in practice for starting 3 phase squirrel cage induction motors . (L. U.)

A delta connected, 3 phase, 220 V, 50 c/s squirrel cage induction motor has 4 poles and runs at a speed of 1440 r.p.m when it develops an output of 15 H.P. The power factor is 0.85, the mechanical losses are 0.75 H.P, and the stator losses are 1200 watts .

(a) Calculate for this load the slip, the rotor copper losses, the efficiency, the torque and the line currents .

(b) Find the value of the maximum torque if it were developed at 1100 r.p.m,

24A

21. Explain two different methods for starting a squirrel cage induction motor .

A 6 pole, 3 phase induction motor develops 30 H.P., including mechanical losses of 2 H.P., at a speed of 950 r.p.m. on 550 V, 50 cycle mains. The power factor is 0.89. Calculate for this load (a) the slip; (b) the rotor copper loss; (c) the total input if the stator losses are 2000 W; (d) the efficiency; (e) the line current; (f) the number of complete cycles of the rotor e.m.f. per minute .

22. A 6 — pole, 50 C/S, 3 — phase induction motor running on full — load develops a useful torque of 120 lb. ft. and it is observed that the rotor e.m.f. makes 90 complete cycles per minute. Calculate the B.H.P. if the mechanical torque lost in friction be 10 lb . ft. Find the copper loss in the rotor windings, the input to the motor and the efficiency. Stator loss = 750 watts .

23. A squirrel cage induction motor runs at a slip of 5% at full load. Assuming the rotor resistance is independent of rotor frequency and neglecting rotational losses and stator impedance.

a) Compute the ratio of the starting torque to the full load torque .

b) Compute the ratio of the maximum torque to the full — load torque and the slip at which maximum torque occurs .

24. A 4 — pole, 50 C/S, 3—phase induction motor has rotor resistance per phase of 0.02 ohm and reactance of 0.12 ohm per phase. what is the value of speed at maximum torque? Find the amount of external resistance per phase required to be inserted to obtain 75% of maximum torque at starting .

25. A three — phase, slip rings, induction motor is used to drive a fan. The motor is 20 HP, 16 pole, working at 50 C/S, the full — load slip is 0.03, and the resistance measured between 2 slip rings = 0.04 ohm at stand still. The (slip / torque) curve of the motor is assumed to be a straight line .

This motor is required to drive a fan. The fan requires a torque of 8000 NW — mt. to be driven at a speed of 280 r.p.m. and in general its torque is proportional to the square of its speed .

a) What value of a resistance which must be inserted in series with each rotor winding so that the I. M. drive this fan at a speed of 320 r. p.m.?

b) What is the percentage overloading at this condition ?

26. A 300 H. P., 3000 volts, 3 — phase I. M. has a magnetizing current of 20 amps. at 0.10 power factor & a short circuit (or block) current of 240 amps. at 0.25 power factor . Draw the circle diagram, determine the power factor at full — load & the maximum H. P.

27. Draw the circle diag. for a 20 H. P., 440 volt, 50 c / s, 3 — phase I. M. from the following test figures (line values.) .

No load : 440 volts, 10 amps, power factor 0.2

Short circuit : 200 volts, 50 amp, power factor 0.4

From the diagram estimate (a) the line current & power factor at full - load b) The maximum H. P. c) The stalling torque. Assume the rotor and stator I^2R losses on short circuit to be equal .

28. The following particulars apply to a 200 H.P., 3- phase

25 c/s, 5000 volts I. M. with stator and rotor winding star connected. Turns per phase, stator = 576 $R_1 = 3.6$ ohm, $R_2 = 0.03$ ohm, $X_1 = 16$ ohm, $X_2 = 0.07$ ohm. No load current = 6 amps. at 0.07 p.f. Draw the circle diagram & determine from it the starting torque on full voltage with the rotor short circuited, the full load current & power Factor .

29. A delta connected, 3 phase, 220 V, 50 c/s, 4 pole induction motor develops 10 brake H.P. at 1420 r.p.m. and 0.8 power factor. The mechanical losses are 0.6 H.P. and the stator losses are 740 watts.

(a) Calculate for this load the slip, the rotor copper losses, the efficiency and the phase current :

(b) Find the ratio of the starting to full load current when the motor is started with a star delta switch. given that the motor takes a short circuit current of 50 amps when 110 V are applied to the stator in delta connection .

30. Draw the circle diagram for a 5 H. P. 200 V, 50 c/s, 4 pole, 3 phase : star connected induction motor from the following test data : -

No load : line voltage 200 V, line current 7 amps, power input 350 watts. Short circuit : line voltage 100 V, line current 29 amps, power input 1700 watts .

Estimate from the diagram the full load current, power factor and torque assuming the stator copper losses at standstill to be equal to the rotor copper losses .

31. A 6 - pole 3 - phase induction motor takes 21 A and 1.55 kW when running unloaded on a 440 - volt 3 - phase 50 c/s

supply. With the rotor locked and the stator input voltage reduced to 110 V, the current taken is 60 A and the power input is 8.3 kW. The friction loss is known to be 400 W and the resistance of the delta connected stator is 0.45 ohm / phase :

Construct the circle diagram for the motor on squared paper and obtain from it the input current and power factor when the motor is delivering 50 b. h. p. Determine also the maximum torque developed with the rotor short - circuited and the speed at which this is obtained .

32. A 40 H.P. 500 V, 6 pole, 3 phase, 50 c / s delta connected induction motor gave the following test results :
No load — line voltage 500 V, line current 18 A, total input 1200 W. Short circuit - 250 V (line value), line current 100 A, total input 11000 W.

The resistance per phase of the stator winding is 0.6 ohm and of the rotor winding 0.15 ohm. The stator to rotor turns ratio is 2. Draw the circle diagram and find (a) the full load line current and power factor, (b) the maximum output and the maximum torque, (c) the starting torque with the rotor short circuited .

33. A 3 - phase, 300 H.P, 50 cycles / sec., 20 poles, 3000 volt induction motor has the stator winding connected in star and the rotor winding in delta .

There are 180 slots and 10 conductors per slot on the stator and 240 slots and 2 conductors per slot on the rotor. Neglecting the drops due to the stator resistance, and leakage

reactance, calculate the flux per pole, rotor E.M.F. when stationary and when running with a slip of 2% .

34. A 3 - phase, 50 cycles / sec., 500 volt slip ring induction motor has both stator and rotor windings star connected, the ratio of rotor to stator turns being 0.7. The stator resistance per phase is 0.2 ohms and its leakage inductance per phase is 0.003 H. Determine, neglecting stator resistance and leakage reactance as well as the magnetising current ;

a) The rotor current, power factor, torque and torque angle during starting on normal voltage with the slip rings short circuited .

b) The stator and rotor currents and power factor for full load and slip of 3%

c) The external resistance per rotor phase to obtain a starting current of 60 amp. in the stator .

35. For a 25 — H.P, 230 volt, 3 — phase, 60 cycles / sec squirrel — cage induction motor operated at rated voltage and frequency, the rotor copper loss at max. torque is 9 times that at full load torque, and the slip at full — load torque is 0.03. Stator resistance and rotational losses may be neglected and the reactances and rotor resistance assumed to be constant . Find :

a) The slip at max. torque .

b) The ratio of max. torque to full load torque .

c) The ratio of the starting torque to the full load torque.

36. A squirrel cage induction motor runs at a slip of 5% at full load. The motor current at starting is 5 times the rotor

current at full load. The rotor resistance is independent of rotor frequency, and rotational losses, stray load losses and stator resistance may be neglected .

a) Compute the ratio of the starting torque to the full load torque .

b) Compute the ratio of the max. torque to full load torque and the slip at which max. torque occurs .

37 A 3 - phase induction motor has a full load current of 100 amp. at 440 volt.

A no - load and a short circuit tests carried out on this motor gave the following results :

| | Terminal voltage (volts) | Line current (amp) | p.f. |
|-------------------|--------------------------|---------------------|------|
| No - load : | 440 | 30 | 30% |
| Short - circuit : | 120 | 150 | 40% |

Find :

a) The full - load slip, p.f., efficiency.

b) Max. p.f. and max. output horse - power .

c) If it is required to limit the starting current of this motor to 200% of the full - load value by means of ;

i) Reducing the supply voltage .

ii) Inserting additional rotor resistance .

Find the ratio of the starting torques obtained by the two methods.

Assume stator and rotor copper losses to be equal at short circuit .

38. A 400 H.P, 3000 V, 3 phase, 50 c/s, slip ring induction

motor has a synchronous speed of 750 r.p.m. The stator and rotor Windings are star connected and have the following particulars:- turns per phase : stator 240, rotor 46; resistance per phase : stator 0.8 ohm, rotor 0.03 ohm; reactance per phase : stator 4.2 ohms, rotor 6.1 ohm. The magnetising current is 18 amps and the total no load losses are 8.5 KW. Draw the circle diagram and determine from it :

(a) the full load current and power factor.

(b) the starting torque and the ratio of maximum to full load torque .

39. A certain 3 phase, 12 pole induction motor is rated 400 H.P, 2 00 V and 50 c/s. At no load with rated voltage and frequency, the line current is 20 A and the power input is 14 KW. The stator and rotor windings are star connected and have the following particulars : Turns per phase, stator 108, rotor 36, Resistance per phase stator 0.5 ohm, rotor 0.055 ohm :

Reactance per phase, stator 1.9 ohm, rotor 0.22 ohm, Draw the circle diagram and find from it the full load current and power factor. Find also the maximum torque and the speed at which it occurs :

40. The following data refer to the design of a 100 H. P., 50 c/s, 8 pole, 500 V, slip ring induction motor with 3 phase, star connected stator winding : - turns per phase : stator 54, rotor 35. Resistance per phase: stator 0.062 ohm, rotor 0.019 ohm. Reactance per phase : stator 0.21 ohm, rotor 0.064 ohm. Magnetising current 36 amps per phase, Iron, friction and Windage losses 2250 W. Draw the circle diagram and deduce from it the line current and power factor. Find also the maximum output, the maximum and starting torques.

41. A 10 H. P., 110 V, 50 c/s, 4 pole, 3 phase, star connected induction motor gave the following test results :

No load : line voltage 110 V, line current 21 amps, power input 650 W. Short circuit : line voltage 24 V, line current 51 amps, power input 1040 W. Draw the circle diagram and find the full load line current, power factor and the maximum torque. Assume equal stator and referred rotor resistances.

42. The following data refer to a 60 H.P., 3 phase, 6 pole, 50 c/s, 380 V slip ring induction motor with the stator and rotor windings star connected : turns per phase, stator 72, rotor 40, resistance per phase, stator 0.052 ohm, rotor 0.016 ohm, reactance per phase stator 0.18 ohm, rotor 0.03 ohm, no load current 30 amps at 0.13 power factor. Draw the circle diagram and determine from it the full load current and power factor. Find also the starting and maximum torques.

43. A 40 H.P., 500 volt, 6 pole, 3 phase 50 c/s, mesh connected induction motor has a ratio stator to rotor turns of 2. The no load and short circuit test data (line values) are :

No load : 500 volts, 16 amps., power factor 0.08.

Short circuit : 250 volts, 100 amps., power factor 0.25.

The stator and rotor resistances per phase are 0.6 ohm and 0.15 ohm respectively. Draw the circle diagram and find :
(a) the full load line current and power factor, (b) the starting torque :

44. Draw the circle diagram of a 10 — hp, 200 — V, 50 c/s, 3 — phase, slip — ring induction motor with a star — connected stator and rotor, a winding ratio of unity, a stator

2.4

resistance of 0.38 ohm/ phase and a rotor resistance of 0.24 ohm/ phase. The following are test readings :

No - load : 200V, 7.7 A, $\cos \phi_0 = 0.191$.

short - circuit : 100V, 47.6A, $\cos \phi_s = 0.454$.

Find : (a) starting torque .

(b) maximum torque in synchronous watts .

(c) the maximum power factor .

(d) the slip for maximum torque and .

(e) the maximum output .

45. The following particulars apply to a 3 - phase, 1000 hp, 2500 - V induction motor with stator and rotor windings star — connected :

Turns / phase : stator 210, rotor 50 .

Resistance / phase : stator 0.5 ohm, rotor 0.02 ohm

Leakage reactance / phase : Stator 2 ohm, rotor 0.058 ohm

Magnetising current : 45 Amp.

Total no - load loss : 21.65 KW

Draw to scale the circle diagram and determine the current, power factor, efficiency and slip at full — load and also the starting torque with full - load applied (expressed as a percentage of full - load torque) .

49. Indicate briefly how the vector voltages or currents in an unbalanced 3 - phase system can be analysed in terms of three systems of balanced vectors having positive, negative and zero phase - sequences. What circuit conditions determine in general the presence or absence of the zero sequence component ? .

Analyse the following three unbalanced voltages into their sequence components :

$$V_R = 1500 / 120^\circ \quad V_Y = 500 / 60^\circ \quad V_B = 1000/0$$

Verify your result by reconstructing V_Y graphically from the components .(L.U:)

47. A 50 h.p., 440V, 3 - phase synchronous - induction motor has as a plain induction motor a full - load power factor of 0.8 and an efficiency of 0.82 per cent, its light - running current being 28 A at 0.15 power factor. The torque line on its circle diagram is at 10 degrees to the diameter of the circle. The motor is run as a synchronous - induction motor and the excitation is adjusted so that the full - load torque is developed at 0.9 leading power factor. Estimate the stator current which has the same fluo - producing ability as the actual d.c. excitation of the motor. what will the ratio of the maximum input to the full - load input be for this excitation ? . (L.U)

48. A 4 - pole, 3 - phase, 50 c/s cage rotor has 51 bars. The stator winding is star - connected. The full - load stator current is 17.5 A at 0.85 power factor and the no - load stator current is 6.5 A at 0.15 power factor. There are 1008 stator conductors in 48 slots. Estimate the current in each rotor bar and end ring at full load, justifying any expression used . (L.U.)

49. (a) The following methods for obtaining variable speed drives are used in practice :

- (i) The scherbias cascade .
- (ii) The Kraimer cascade .
- (iii) The Ward Leonard system of control .

Give a connection diagram for each of them and explain briefly how the variable speed is obtained in each case. What

are the factors which are taken into consideration when choosing one of these drives? Give examples from actual practice.

(b) A 12 pole induction motor, with 6 slip rings, has a standstill rotor voltage of 600 V per phase. Together with a rotary converter and a motor generator it forms a Scherbius cascade. The motor generator consists of a D.C motor with a maximum E.M.F. of 500 V and an alternator. Find the lowest no load speed of the induction motor.

50. Draw a sketch showing the main parts and the different windings of the Schrage motor. Indicate the function of each winding and explain briefly how the speed of the motor could be varied over a wide range.

A 50 c/s, 6 - pole Schrage motor has a maximum voltage of 18 volts between the brushes of each pair on the commutator. The voltage induced in each phase of the stator winding at standstill is 36 volts. Assuming ideal conditions find the lowest and highest no load speed of the motor.

15. A 3 - phase induction motor has a 10 pole, star connected stator winding, which is fed from a 2000 volt, 50 c/s supply. The rotor resistance is 0.023 ohm and reactance 0.16 ohm per phase. The ratio of stator to rotor turns is 5.5. The stator has a resistance of 0.7 ohm and reactance of 4 ohms per phase. The motor takes a current of 15 amperes at 0.07 power factor on no load when connected to the same supply.

Draw the circle diagram and determine from it the line current and power factor for an output of 147 horse power. Determine also the starting torque and the value of the resistance which must be added to each rotor phase to obtain maximum torque at starting.

52. The following particulars apply to a 3 phase, 1000 H.P. 3000 V induction motor with stator and rotor windings star connected :

turns per phase stator 210, rotor 50 .

resistance per phase stator 0.35 ohm, rotor 0.020 ohm .

leakage reactance per phase stator 2.0 ohms, rotor 0.058 ohm .

Total iron loss 6.0 KW, friction and windage 4.0 KW magnetising current 50 amperes .

Draw clearly to scale the circle diagram and determine the current, power factor, efficiency and slip at full load, also the starting torque with full voltage applied (expressed as a percentage of full load torque.) (L. U.) .

53. An 1100 V, 50 - c/s, 3-phase, mesh - connected induction motor has an efficiency of 90% and a power factor of 0.85 when supplying a mechanical load of 600 hp.

An 1100 V, 50 - c/s, 3 - phase, star - connected synchronous motor has an efficiency of 87% and is to supply 100 hp. It is to be connected in parallel with the above induction motor and operated at such a leading power factor as to make the overall power factor 0.95 lagging.

Determine the power factor of the synchronous motor, the induction motor, the phase current of the synchronous motor and the equivalent capacitance per phase of the synchronous motor. (L.U.)

54. Show analytically how the vector voltages or currents in an unbalanced 3 - phase system can be expressed in terms of

three systems of balanced vectors having positive, negative and zero phase - sequences .

Calculate the unbalanced current vectors represented by the three sequence components :

$$I = 350 \angle 213^\circ, I = 82.5 \angle 156^\circ, I = 167.5 \angle 139^\circ.$$

Verify your result by analysing the resultant vectors graphically into the original components . L.U.

55. The results of load test on a $\frac{1}{4}$ HP, 60 C/S, 4 poles, single phase induction motor are as follows: Applied voltage = 115 volts, at 60 C/S, main winding current = 3.7 amp., and power input = 270 watts. The auxiliary winding was open circuited during this test. The main winding resistance $r_1 = 2$ ohms and the backward resistance during this test $R_b = 1.5$ ohms. Compute the net internal torque for the conditions of the load test. Express the torque in NW - mt. and neglect rotational losses .

56. From the following test data find the equivalent circuit parametes at 70° C and no - load rotational losses. The data apply to a $\frac{1}{4}$ HP, 110 volts, 50 c/s, 4 poles, single - phase induction motor :

No - load test : $V = 110$ V, $I = 2.73$ amp., input power = 56 watts.

Blocked rotor test: $V = 110$ V, $I = 16.6$ amp., input power = 1260 W.

Resistance of main winding after no - load test is 1.46 ohms, after blocked rotor test is 1.47 ohms and at normal working temperature is 1.5 ohms .

57. A $\frac{1}{4}$ HP, 4 poles, 110 - volts, 6 C/S, single - phase induction motor, whose constants are given below :

$$R_1 = 1.86 \text{ ohms} . \quad X_1 = 2.56 \text{ ohms} .$$

$$\text{Rotor referred resistance} \quad 2R_2 = 3.66 \text{ ohms} .$$

$$\text{» » reactance} \quad 2X_2 = 2.56 \text{ ohms} .$$

$$\text{and magnetizing reactance} \quad 2X_m = 53.5 \text{ ohms} .$$

$$\text{core losses} = 35 \text{ watts} .$$

$$\text{Friction and windage} = 13.5 \text{ watts} .$$

Find the mechanical power output, torque, efficiency and power factor at a slip of 0.05.

58. Find the main dimensions and arrange suitable stator windings giving proper dimensions of the slots for the following 3 - phase induction motors :

$$1 - 500 \text{ KW, } 6000 \text{ V, } 50 \text{ Hz, } 125 \text{ r.p.m., } \cos\phi = 0.7,$$

$$\eta = 0.9, B = 4350 \text{ Gauss, } \tau_p = 17.1 \text{ cms, } \delta = 2.94 \text{ amps/mm}^2$$

$$AC = 407 \text{ ampcond/cm}$$

$$2 - 8.11 \text{ HP, } 380 \text{ V, } 50 \text{ HZ, } 1500 \text{ r.p.m., } \cos\phi = 0.86$$

$$\eta = 0.85, B = 5320 \text{ Gauss, } AC = 234, \frac{I_l}{\tau_p} = 0.88$$

$$\delta = 4.1 \text{ amps / mm}^2.$$

59. A 3 - Phase, 10 pole, 50,c/s star connected induction motor has a flux per pole of 2.42 megalines and a magnetic circuit having the following particulars : Core length 25 cms including 3 ducts each 1.0 cm wide, the stator has 90 paralle sided slots each 1.0

cm wide and 4.2 cms deep and containing 15 conductors; stator bore diameter 65 cms, gap length 0.9 mm and gap coefficient 1.15. The rotor has 60 parallel sided slots each 0.7 cm wide 3.5 cms deep. Stator and rotor core depths 5.3 cms. Iron factor 0.9 .

Estimate the magnetising current of the motor, using the following curve for ordinary steel sheets ,

| | | | | | | | | | | | | |
|---|---------------|---|-----|---|----|---|----|----|----|----|---|----|
| H | ampturns/cm | 0 | 1 | 2 | 5 | 8 | 12 | 20 | 40 | 60 | | |
| B | Kilo lines/cm | 0 | 4.3 | 8 | 11 | 5 | 13 | 14 | 15 | 16 | 2 | 17 |

60. Derive an expression relating the currents in the end rings with those in the conductors in the slots of the cage of an induction motor.

Use the expression to determine the full-load current in the end rings of the cage rotor of a 4 - pole induction motor. The cage has 51 bars and full-load ampere - conductors of the rotor are 23000. (L.U.)

61. A 3 - phase, 6 - poles, 535 horsepower star connected induction motor is to be operated from 3000 V, 50 Hz supply at 0.89 power factor and with an efficiency 0.94. Assuming mean specific magnetic loading 4500 Gauss, specific electric loading 384 amp. cond./cm, winding factor 0.95 and ratio armature length to pole pitch length 1.8, find the main dimensions of the motor.

Assume $K_w = 0.95$.

For a total number of armature slots 72, an effective gap length 2 mms and a slot 1.2 cm wide and 6 cms deep, find the magnetising current for the motor, assuming total number of ampere turns per pole equal to 1.2 times the ampere turns for

the air gap and armature teeth. Use the following magnetization curve for iron

| | | | | |
|-----------------|---|-----|-----|-----|
| H amp. turns/cm | 0 | 100 | 350 | 600 |
| B Kilo Gauss | 0 | 16 | 21 | 22 |

62. The magnetic circuit of a 440 volt, 6 pole, 50 c/s, 3 phase, star connected induction motor has the following particulars: core length 15 cms (excluding ducts); the stator has 72 parallel sided slots, each 1.13 cm wide 3 cm deep and containing 8 conductors. Stator bore diameter 40 cm/s gap effective length 0.9 mm. The rotor has 49 slots; rotor teeth length 1.5 cms. width at one third from root 1.05 cms. Stator and rotor core depths 6.5 cms. Neglecting voltage drop, estimate the magnetizing current using the following curve for ordinary steel sheets :

| | | | | | | | | | |
|------------------------------|---|-----|---|------|----|----|----|------|----|
| amp. turns/cm | 0 | 1 | 2 | 5 | 8 | 12 | 20 | 40 | 60 |
| B kilo lines/cm ² | 0 | 4.3 | 8 | 11.5 | 13 | 14 | 15 | 16.2 | 17 |

Use an iron factor of 0.9

63. A 4-pole D.C. shunt motor is used separately excited for rheostatic braking of its connected load. Determine the time taken to reduce the speed from 120 to 4 r.p.m. assuming the following data : field flux constant at 2.2 Megalines ; Maximum allowable value of the armature current 35 amps. which is kept constant during braking until all external resistance is cut out. The armature is wave connected with 294 armature conductors. The flywheel moment of the armature and connected load is 1400 Kgm² : armature circuit resistance 0.03 ohm.

64. A 500 V, D.C. shunt motor has an armature resistance of 0.04 ohm and with full field an e.m.f. of 492 V at a speed of 1000 r.p.m. It is coupled to an overhauling load with a torque of 28.5 Kgm. Determine the lowest speed at which the motor can hold the load by regenerative braking.

65. The following gives the magnetisation curve of a D.C. series motor, which is straight up to a field current of 10 A.

| | | | | | | | | | |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|
| Field Current | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | amps. |
| e.m.f. at 600 r.p.m. | 128 | 234 | 300 | 340 | 366 | 388 | 404 | 420 | Volts. |

Calculate and plot the speed to torque characteristics when it is used for rheostatic braking with a total circuit resistance of

- (a) 1.5 ohm (b) 4 ohm.

66. A D.C. shunt motor has a magnetisation curve as follows :

| | | | | | | | | | | |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|------|------|
| Field Current | 2.5 | 5 | 7.5 | 10 | 12.5 | 15 | 17.5 | 20 | 22.5 | 25.A |
| e.m.f at 1200 r.p.m. | 50 | 100 | 147 | 180 | 205 | 220 | 232 | 242 | 250 | 258V |

The armature resistance is 0.05 ohm and the field winding resistance 10 ohms.

Plot the speed/torque curve when the motor is used for rheostatic braking with a load resistance of

- (a) 1 ohm (b) 2 ohm

67. An electric drive for raising a weight of 1200 Kg. at a uniform velocity of 0.9 m/sec. with an efficiency of 0.82, the motor is 3-phase, Squirrel cage, delta connected, supplied from 380 V supply at 0.85 power factor, and has an efficiency of 0.87. Find the line and phase currents of the motor.

68. The speed of the motor in an electric drive drops from the no load speed of 980 to 920 r.p.m. in 1.25 sec. after the motor has been disconnected from the supply. The no load power input to the motor is 2.8 KW. and the efficiency at the specific load is 0.78. The load runs at a speed which is half that of the

210
motor. Find the equivalent fly wheel moment of the drive referred to the rotor shaft.

69. The squirrel cage induction motor in an electric drive is rated at 8KW and 965 r.p.m. The motor is started by using a star delta switch and has a short circuit current which is 5 times the full load current. The ratio of motor resistance to standstill reactance per phase is 0.1. If the motor is started against half the full load torque and the total equivalent fly-wheel moment of the drive referred to the motor shaft is 15 Kgm^2 . Find an approximate value of the starting time.

70. Select the proper motor for moving a crane weighing totally 25 tons at a speed 1 m/sec. The motor should develop a torque of at least twice the value of the rated torque at the speed 900 r.p.m. The crane rollers have a diameter of $D_r = 700 \text{ mms}$ and the journal of the roller axles have diameter $d_j = 80 \text{ mms}$. The maximum length of the crane run is $L = 45 \text{ ms}$. Determine the lowest speed at which the motor can hold the load by regenerative braking.

71. State briefly the possible functions of the damper-winding in a big synchronous motor. Show how the construction of this winding is adapted to suit such functions.

A 16-pole synchronous motor, which is connected to a 60 Hz supply is rated 3500 KW at 0.95 power-factor and has an efficiency of 97%. GD^2 of the motor and load is 90 ton-m^2 and $i_f = 2 \text{ A}$. The weight of steel in the rotor damper winding is

300 Kgs with a specific heat equivalent of 482 Joules/Kg - 1°C . The motor drives a one-cylinder double acting compressor, which requires a power of 3000 KW. The torque-time curve of the compressor contains a first harmonic of $\pm 10\%$ and a second harmonic of $\pm 20\%$. Calculate the temperature rise of the damper-winding at the end of the starting period and find the first and second harmonic of the pulsating power input to the motor, when it is running with the compressor on full load.

72 A 4-pole, D.C. shunt motor, which is rated 60 HP, and supplied from 110 V mains, with an efficiency of 0.9 runs at full load at a speed of 500 r.p.m. The armature of the motor is disconnected from the supply and switched over to an external resistance, arranged for rheostatic braking, which will keep the current constant at its full load value, while it is being cut out gradually from the armature circuit until it is short circuited. The armature is wave connected with 306 conductors, and total circuit resistance of 0.02 ohm.

Assuming the motor to be separately excited during the period of braking, with the flux per pole constant at the full load value, find the initial value of the resistance required and the time of braking down to a speed of 5 r.p.m. Total equivalent flywheel moment referred to motor shaft is 940 Kg.m.²

73. Deduce an expression for the equivalent total fly-wheel moment of an electric drive $(GD^2)_d$ referred to the motor shaft, assuming the load of weight W be moved with uniform linear velocity v . Describe briefly an experiment for determining this value.

74. Differentiate between constant power and constant torque drives, giving examples with two variable speed cascade connections, in which the main drive is on the shaft of a 3-phase slip-ring induction motor. Name two types of industry in which these drives are used with advantage, explaining briefly why.

75 Explain briefly the reasons why a synchronous motor should be equipped with a damper winding.

A 2000 HP, 24 pole synchronous motor has an efficiency of 0.96 and a power factor of 0.94 when connected to 50 Hz infinite bus bars. The equivalent fly wheel moment of the rotor and load together is 65 tm^2 and the short circuit reactance is 57 %. Find the weight of steel in the rotor damper winding if its temperature rise at the end of the starting period should not exceed 150°C . Use a specific heat equivalent for steel of 432 Joules/Kg. 1°C .

If the load on the motor constitutes a one cylinder double acting compressor, which requires a power of 1800 HP, and whose torque - time curve contains a first harmonic of $\pm 12\%$ and a second harmonic of $\pm 25\%$, find the first and second harmonics of the pulsating power input to the motor.

76. Explain briefly, aided with a connection diagram, how dynamic braking is effected in the case of direct current motors

A 4-pole, D.C. shunt motor, which is rated 60 HP, and supplied from 110 V mains, with an efficiency of 0.9, runs at full load at a speed of 500 r.p.m. The armature of the motor

is disconnected from the supply and switched over to an external resistance, arranged for rheostatic braking, which will keep the current constant at its full load value, while it is being cut out gradually from the armature circuit until it is short circuited. The armature is wave connected with 306 conductors, and total circuit resistance of 0.02 ohm.

Assuming the motor to be separately excited during the period of braking, with the flux per pole constant at the full load value, find the initial value of the resistance required, and the time of braking down to a speed of 5 r.p.m. Total equivalent flywheel moment referred to motor shaft is 940 Kg.m²

77. A.D.C. shunt motor has a lap wound armature with 288 conductors and is fed from 220 Volt supply. The total armature circuit resistance is 0.06 ohm and the shunt field winding resistance is 17.6 ohms. The motor has the following magnetisation curve at 1000 r.p.m.

| | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| Field current I_f (ams) | | | | | | | | | |
| | 2.5 | 5 | 7.5 | 10 | 12.5 | 15 | 17.5 | 20 | |
| Flux per pole ϕ (mega-lines) | | | | | | | | | |
| | 1.04 | 2.08 | 3.06 | 3.74 | 4.27 | 4.58 | 4.83 | 5.04 | |

If reverse current braking is used and the armature current is not to exceed 25 amps while braking, find the value of the suitable resistance to be used and the time taken for braking the motor speed from 950 to 400 r.p.m. Assume an equivalent flywheel moment for the armature and load together of 350Kg.m² Find also the values of energy supplied to the resistance from the motor kinetic energy and from the supply.

78. Discuss the question of rotational inertia in connection with electric traction. Indicate briefly the calculations involved.

A 4-car electric suburban train has an initial acceleration of 1.8 m.p.h./s. Each coach runs on 2 bogies. The total weight of a loaded motor bogie is 26 tons and of a trailing bogie 14 tons. Allowing 10 % for rotational inertia, a tractive resistance of 6 lb/ton and a minimum adhesion coefficient of 0.15, find the minimum number of motor bogies required. Ignore any effects of weight transfer in the bogie suspension, and justify any formulae used. (L.U.)

79. Define the term specific energy output as applied to an electric train service.

An electric train accelerates from rest up a gradient of 1 in 56 for half a mile and then on level track until a speed of 60 m.p.h. is reached. Acceleration may be taken as constant at 0.5 m.p.h./s. throughout this period. Power is then shut off and the train is brought to a standstill one mile further on. Calculate the specific energy output for the run. Allow 10% of the train weight for rotational inertia and 10 lb/ton for tractive resistance. Derive any formulae used: (L.U.)

80 A 150 ton train is equipped with 4 motors each rated 350 HP at 746 r.p.m. The motors develop constant torque in the starting period, which amount to 1.1 times their rated value, until the train reaches its maximum speed. The supply is then shut off and a coasting period follows until braking begins. Braking is made during 10 seconds at a rate of 3.5 Km.p.h.p.s.

until the train finally stops at the next station. The train travels the distance between the stations with a down gradient of 0.1 per cent in 130 seconds. Determine the value of the maximum speed attained during the run, the distance between the two stations and the total energy supplied to the driving wheels, assuming the following data : driving wheel diameter $d = 1020$ mms; gear box ratio and efficiency $\epsilon = 3.5$, $\eta = 0.96$ effective weight 1.1 times dead weight, constant train resistance 4 kgs per ton.

81. Why are motors with series characteristics generally used for traction purposes?

A train weighing 200 tons is accelerated uniformly from rest to a speed of 45 Km/h up a uniform gradient of 1 in 500, the time taken being 30 seconds. The power is then cut off and the train coasts down a uniform gradient of 1 in 1000 for a period of 40 second, when the brakes are applied for a period of 15 seconds so as to bring the train uniformly to rest on this gradient. The train stays 20 seconds at the station. Calculate:

- a) The maximum power output from the driving axles.
- b) The energy taken from the conductor rails in KWH.
- c) The schedule speed of the train.

Assume constant tractive resistance of 4.5 Kg/ton, energy efficiency during acceleration 60% and allow 10 percent for rotational inertia.

82. A 250 ton train has a gross tractive effort of 16790 Kgs

which may be assumed constant during the acceleration period until maximum speed is reached. the supply is then shut off and a coasting period follows until braking begins. Braking retardation is made at a rate of 3.5 km.p.h.p.s. during 10 seconds until the train travels the distance between the two stations, with an up-gradient of 0.066 percent in 130 seconds. Determine the value of the maximum speed attained during the run, the distance between the two stations in kms and the total energy supplied to the driving wheels.

Assume an effective weight for the train of 1.1 its dead weight and a constant train resistance of 4 kgs per ton.

83. Why are motors with series characteristics generally used for traction purpose?

Ad.c. series traction motor has the following characteristics:

| | | | | |
|--------------------------|-----|-----|------|------|
| Current (amps) | 100 | 200 | 300 | 400 |
| Speed (Km/h) | 66 | 45 | 87.3 | 34.3 |
| Tractive effort (Kgs) | 290 | 852 | 1517 | 2233 |

Determine the approximate speeds and tractive efforts for the above currents if the motor is operated at the same voltage but with 30% of the field turns cut out.

84. The bogie of a motor-coach is equipped with motors each having characteristics as given in problem (1), which apply to 1066 mms wheels. If the wheels driven by one motor (A) are 1040 mms diameter and those driven by the other

344

motor (B) are 1015 mms diameter, determine. when the motors are operating in parallel and the train speed is 48.5 Km/h, (i) the current input to each motor, (ii) the output at each driving-axle.

85. An electric train maintains a schedule speed of 45 Km/h between stations situated 4.8 Kms apart, with station stop 30 secs. The acceleration is 2.5 Km.p.h./sec. and the braking retardation is 3.2 Km.p.h.p.s. Assuming a simplified rectilinear speed time curve, calculate (a) the maximum speed of the train (b) the energy output of the motors in Wh. per ton, if the tractive resistance is 4.5 Kgs per ton.

86. A 250 ton electric train has an average speed of 51.5 Kms/h between stations on the level situated 2 Kms apart. The acceleration at starting is 2 Km.p.h.p.s. and the braking retardation is 3.7 Km.p.h. /sec. Assuming trapezoidal speed - time curve and a free running speed 30 % higher than the average speed, calculate the specific energy consumption for the run in wh. per ton Kg. and the power in KW usefully employed at the end of the period of acceleration and during coasting. Assume a train resistance of 5.5 Kgs/ton and allow 10% for the effect of rotational inertia.

87. A 130-ton train is equipped with four motors, the characteristics of each at normal voltage are as follows:

| | | | | |
|--------------------------|-------|------|------|------|
| Current (amps) | 100 | 200 | 300 | 400 |
| Train speed (Km.p.h.) | 104.5 | 58.7 | 47.9 | 42.6 |
| Tractive effort (Kgs) | 147 | 618 | 1220 | 1830 |

144

Calculate and draw the speed-time curve and find the value of the r.m.s. current per motor for the run, assuming the following data :

Constant train resistance of 4.5 Kgs/ton; accelerating weight of the train 10% greater than the dead weight ; braking retardation at the rate of 3.5 Km.p.h./sec. constant supply current of 1600 amps. during theostatic acceleration ; maximum speed attained during the run 60 Km/h : the track runs with an up-grade of 0.1 percent. Time of run 100 seconds.

88 Explain, aided with a connection diagram, how we can arrange two identical slip ring induction motors in a selsyn connection (electrical shaft) for the transmission of torque at a certain speed. How could the system function at synchronous speed.

A selsyn connection of the above type uses two identical 6 pole, slip ring induction motors connected to a 60 Hz, 1200 V supply. The power to be transmitted is 50 KW at 480 r.p.m. Find the powers following between the slip rings of the motors, as well as the supply currents for both directions of rotation with respect to the magnetic field. Assume a power factor of 0.8 for both machines.

المراجع

(REFERENCES)

1. Wagner, C.F., and Evans, R.D.: 'Symmetrical components, (Mc Graw-Hill, New York and London 1933).
2. Langsdorf, A.S.: 'Theory of alternating current machinery,' (Mc Graw-Hill, New York and London 1937).
3. Bodefeld und Sequenz : "Elektrische Madhinen," Springer Verlag, Wien.
4. Richter : " Elektrische Maschinen" Verlag Birkhauser, Basel.
5. Nürnberg, W. : " Die Asynchronmaschine, " Springer - Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1952.
6. Still, A., and Siskind, C.S. : "Elements of Electrical Machine Design" Mc Graw Hill Book Company, Inc.
7. Lehmann, W. : "Elektrotechnik und elektrische Antriebe," Springer Verlag 1959.
8. Fitzgerald, A.E., and Kingsley, C. (JR.): " Electric Machinery, " Mc Graw-Hill Book Company, Inc. 1961.
9. Hancock, N.N. : Electric Power Utilisation, Sir Isaac Pitman and Sons Ltd., London 1967
10. Say, M.G. : "Alternating current Machines, " Pitman Publishing 1976

- ١١ - هندسة الآلات الكهربائية ، تأليف الدكتور محمد أحمد قمر ،
الناشر منشأة المعارف بالاسكندرية (جلال حزي وشركاه)
- ١٢ - نظريات وتصميم الآلات الكهربائية، تأليف الدكتور محمد أحمد قمر،
الناشر منشأة المعارف بالاسكندرية (جلال حزي وشركاه)

13. Kamar, M.A. : " The Induction Motor as a Brake with D.C. Excitation," M. Sc. Degree disertation, Faculty of Engineering, Alexandria University, 1951.

14. Kamar, M.A. : " Investigation of the transient period occuring when one supply line to a loaded 3-phase Induction Motor is interrupted," The Bulletin of the Faculty of Engineering, Alexandria University, 1963.

15. Kamar, M.A. : Systematic Method for drawing Vector diagrams of Induction Machines, also with injected secondary voltage, " The Bulletin of the Faculty of Engineering, Alexandria University, 1965

16. Kamar, M.A. : "Speed regulation of Induction Motors by using D.C. Exitation," the Bulletin of the Faculty of Engineering, Alexandria University, 1965.

17. Kamar, M.A. : "Braking of 3-phase Indnction Motors by using unsymmetrical connections and proper rotor resistances, " the Bulletin of the Faculty of Engineering, Alexandria University 1968.

18 Chalmers, B.J., and Bennington, B.J., "Digital computer program for design synthesis of large squirrel-cage induction motors" Proc. IEE, 1967, 114, (2), p. 261 - 268.

19. Fultou, N.N., Slater, R.D., and Wood, W.S., "Design optimisation of small 3-phase induction motors," Proc. IEE, 1976, 123, (2) , p 141 - 144.

20. Kamar, M.A. : "Speed Regulation of 3-phase Induction Motors using unsymmetrical connections. The B.O.F.E., A.U.

21. Kamar, M.A., Hamdi, A., and Nosseir, A.: "Behaviour of a 3-phase 50 Hz Induction Motor operated on a 60 Hz Supply, " the Bulletin of the Faculty of Engineering, Alexandria University 1974

22. Laithwaite, E.R. : "Induction machines for special purposes," Newnes 1966

23. Sorial, N.N.: Analysis and high speed control of Linears Induction Motors," M. Sc. Thesis Alexandria University 1971.

محتويات الكتاب

صفحة

مقدمة الكتاب

الباب الاول

٩

المبادئ الأساسية للمحركات التأثيرية ثلاثية المراحل

٩

تكوين المحرك التأثيرى ثلاثى المراحل

١١

طريقة عمل المحرك بدون حمل

١٦

طريقة عمل المحرك بالحمل

١٩

علاقات القدرة فى المحرك المحمل

٢٢

عزم الدوران

٣١

الدائرة المكافئة ومخطط الدائرة

٤٠

رسم مخطط الدائرة من بيانات التصميم

٤١

رسم مخطط الدائرة من بيانات الاختبار

٤٥

مخطط الدائرة عند استخدام مكثفات لتحسين معامل القدرة

٤٦

المحرك المتزامن التأثيرى

٥١

أمثلة محلولة

٦٦

الدائرة المكافئة المضبوطة للمحرك التأثيرى ثلاثى المراحل

٧٢

مثال محلول

٧٤

تشغيل المحركات التأثيرية ثلاثية المراحل على بندوع غير متزن الضغط

٨٢

مثال محلول

الباب الثاني

صفحة

| | |
|-----|--|
| ٨٥ | تشغيل المحركات التأثيرية ثلاثية المراحل |
| ٨٥ | طرق البدء في المحركات التأثيرية ثلاثية المراحل |
| ٩٠ | مثال محلول |
| | استخدام مقاومات بدء موصلة على التوالي مع ملفات العضو الدائر في |
| ٩٣ | المحركات ذات الحلقات الانزلاقية |
| ٩٤ | طرق البدء المستخدمة مع محركات القفص السنجابي |
| ٩٥ | بدء المحرك ذي القفص السنجابي باستخدام مفتاح نجمة / دلتا |
| ٩٩ | بدء المحرك ذي القفص السنجابي باستخدام المحول الذاتي |
| ٩٠١ | أمثلة محولة |
| ١٠٧ | طرق التحكم في السرعة وتغيير معامل القدرة للمحرك |
| ١١٠ | الطرق الخاصة بتغيير سرعة المحرك فقط |
| | تغيير السرعة مع التأثير على معامل القدرة ، باستخدام مقاومات في |
| ١١٦ | الملفات الثانوية |
| | تغيير السرعة ومعامل القدرة باستخدام المحرك التأثيري مع مجموعة من |
| ١١٧ | الآلات |
| ١١٨ | توصيل كرامر المتتالي |
| ١٢٠ | توصيل شربوس المتتالي |
| | تغيير السرعة ومعامل القدرة باستخدام ضغط محقون في الملفات |
| ١٢٢ | الثانوية |
| ١٣٠ | مغير التردد ذو المبدل ومحرك الشراجا |
| ١٤٢ | أمثلة محولة |

صفحة

| | |
|-----|-----------------|
| ١٤٤ | المولد التأثيرى |
| ١٤٥ | مثال محلول |
| ١٤٨ | مثال محلول |

الباب الثالث

| | |
|-----|---|
| ١٥٣ | بعض المشاكل الخاصة بتشغيل المحركات التأثيرية ثلاثية المراحل |
| ١٥٣ | المشاكل الخاصة بعزم دوران البدء للمحرك |
| ١٥٤ | المحركات ذات قضبان العضو الدائر العميقة |
| ١٥٧ | المحركات مزدوجة القفص السنجاني |
| ١٦٠ | مثال محلول |
| ١٦٣ | ظاهرة الحبو |
| ١٦٦ | ظاهرة التماسك |
| ١٦٦ | إصدار الضجة |
| ١٦٨ | تشغيل المحرك التأثيرى ثلاثى المراحل على تردد يختلف عن تردده الأصلى |
| ١٧٥ | تشغيل المحرك التأثيرى ثلاثى المراحل على خطين عند انفصال الخط الثالث لسبب طارىء |
| ١٧٩ | مثال محلول |

الباب الرابع

| | |
|-----|--|
| ١٨١ | المحركات التأثيرية احادية المرحلة |
| ١٨١ | نبذة عامة |
| ١٨٦ | طرق البدء ومنحنيات التشغيل للمحركات التأثيرية أحادية المرحلة |
| ١٨٧ | المحرك مشطور المرحلة |

صفحة

| | |
|-----|--|
| ١٨٨ | المحرك ذو مكثف البدء |
| ١٨٩ | المحرك ذو المكثف الدائم |
| ١٩٠ | المحرك ذو المكثفين |
| ١٩١ | المحرك ذو القطب المظلل |
| | استخدام نظرية المجال المغناطيسى الدائر في تحليل المحركات التأثيرية |
| ١٩٢ | أحاديه المرحلة |
| ١٩٧ | مثال محلول |
| ٢٠٢ | مقياس سرعة الدوران (أو التاكو متر) العامل على تيار متردد |
| ٢٠٥ | المحرك التأثيرى ثنائى المرحلة |
| ٢٠٦ | مثال محلول |

الباب الخامس

| | |
|-----|--|
| ٢١٠ | تصميم المحركات التأثيرية ثلاثية المراحل |
| ٢١٠ | حساب الأبعاد الرئيسية للمحرك |
| ٢١٤ | اختيار عدد المجارى وتصميم الملفات |
| ٢١٦ | عدد المجارى على العضو الثابت |
| ٢١٦ | ابعاد المجرى والملفات |
| ٢٢٠ | الثغرة الهوائية |
| ٢٢٢ | عدد المجارى فى العضو الدائر |
| ٢٢٤ | عدد الموصلات والضغط المستخدمة فى العضو الدائر |
| ٢٢٦ | التيارات المارة فى القضبان وفى كل حلقة من القفص السنجاني |
| ٢٣٠ | حساب قيمة مقاومه المرحلية للملفات العضو الثابت وملفات العضو الدائر |
| ٢٣٥ | ممانعة التسرب المرحلية لكل من العضو الثابت والدائر |

صفحة

| | |
|-----|---|
| ٢٤٥ | حساب تيار المغطسة المرحلى الداخل من ينبوع |
| ٢٤٨ | أمثلة محلولة |
| ٢٥٥ | استخدام الحاسب الالىكترونى فى تصميم المحركات التأثيرية |
| | حل مسائل التصميم الاصطناعى والترشيد فى المحركات التأثيرية على |
| ٢٥٧ | الحاسب الالىكترونى |
| ٢٥٩ | برامج الحاسب الالىكترونى |

الباب السادس

| | |
|-----|--|
| ٢٦١ | وسائل التحريك الكهربى |
| ٢٦١ | نبذة عن نشوء وتطور تكنولوجيا وسائل التحريك الكهربى |
| ٢٦٤ | الأنواع القياسية للتحريك الكهربى |
| ٢٦٨ | التوازن الديناميكى بين المحرك الكهربى والآلة العاملة |
| ٢٧٢ | أنواع وسائل التحريك الكهربى |
| ٢٧٣ | ديناميكا التحريك الكهربى |
| | القواعد الخاصة بنسبة عناصر الحركة فى وسيلة التحريك بأكملها إلى |
| ٢٧٧ | عمود إدارة المحرك الكهربى |
| ٢٨٤ | تعيين عزم الحدافة |
| ٢٩٠ | أمثلة محلولة |
| | زمن البدء الذى يستغرقه المحرك الكهربى (أو وسيلة التحريك بأكملها) |
| ٢٩٢ | حتى تصل إلى السرعة المعتادة |
| ٢٩٤ | مثالان محلولان |
| ٣٠٢ | حساب زمن القرملة لوسيلة التحريك الكهربى |
| ٣٠٦ | القرملة بالوسائل الكهربائية |

صفحة

| | |
|-----|---|
| ٣٠٩ | الفرملة بالتوليد المرتجع |
| ٣١٠ | مثال محلول |
| ٣١١ | الفرملة ديناميكا |
| ٣١٢ | مثال محلول |
| ٣١٥ | الفرملة بالتيار المعكوس أو عن طريق التبديل |
| ٣١٦ | مثال محلول |
| ٣٢٠ | فرملة المحركات التأثرية باستخدام التيار المستمر |
| | فرملة المحركات التأثرية باستخدام التوصيلات غير المتماثلة للمفات |
| ٣٣١ | العضو الثابت مع الينبوع، وتوصيل مقاومات في دائرة العضو الدائر |
| ٣٣٣ | أمثلة محلولة |

الباب السابع

نظريات على وسائل التحريك الكهربى

| | |
|-----|--|
| ٣٣٧ | (أولاً) المبادئ الأساسية لوسائل الجر الكهربى |
| ٣٣٧ | الأنظمة المستخدمة في وسائل النقل الكهربى |
| ٣٣٨ | مزايا وعيوب استخدام وسائل الجر الكهربى |
| ٣٤٠ | الأنظمة المختلفة لتغذية شبكات الجر الكهربى |
| ٣٤٣ | قوانين الميكانيكا الخاصة بحركة القطار |
| ٣٤٩ | مثال محلول |
| ٣٥٠ | منحنى السرعة مع الزمن |
| ٢٥٤ | منحنى شبه المنحرف للسرعة مع الزمن |

صفحة

| | |
|-----|---|
| ٣٥٦ | تأثير السرعة الحسابية على كل من التعجيل والفرملة والمسافة |
| ٣٦٠ | مثالان محلولان |
| ٣٧١ | (ثانيا) عمود الإدارة الكهربى (توصيلات التزامن الذاتى) |
| ٣٧١ | تكوين عمود الإدارة الكهربى |
| ٣٧٤ | سريان القدرة فى عمود الإدارة الكهربى ثلاثى المراحل |
| ٣٧٥ | عمود الادارة الكهربى المعوض |
| ٣٧٨ | مثالان محلولان |
| ٣٨٢ | (ثالثا) المحركات التأثيرية الخطية |
| ٣٨٢ | منشأ المحركات الخطية |
| ٣٨٤ | المجال المغناطيسى السيار |
| | المحرك الخطى ذو العضو الثابت القصير والمحرك ذو العضو الدائر |
| ٣٨٥ | القصير |
| ٣٨٧ | العضو الثابت مزدوج الجانبين |
| ٣٨٩ | بعض المبادئ الأساسية الخاصة بالمحركات التأثيرية الخطية |
| ٣٩٢ | مسائل متنوعة |
| ٤٢٧ | محتويات الكتاب |

تصويب الأخطاء.

| تصويبه | الخطأ | السطر | صفحة |
|--|--|-------|------|
| I'_{2s} | I'_s | ٢٢ | ١٧ |
| $3 I'_{2s} R_2$ | $3 I_{2s} R_2$ | ١ | ٢١ |
| $\therefore P_{12}$ | $\therefore P_{12}$ | ٨ | ٢١ |
| $3 p E_1^2$ | $2 p E_1$ | ١٠ | ٢٣ |
| $2 \pi f_1 \times 9.81 \times 10^{20}$ | $2 \pi f_1 \times 9.81 \times 10^{20}$ | الشكل | ٢٤ |
| تخذف | (P.U. torque) | ٥ | ٢٥ |
| $S_m \times 2 S_m \infty$ | $S_m \times 2 S_m$ | ٧ | ٢٥ |
| $S_m^2 + \infty^2 - 2 S_m^2$ | $S_m^2 + \infty - 252 m$ | ١ | ٢٦ |
| 200 | 002 | الشكل | ٢٧ |
| (١ - ٥) | (١١ - ٥) | ١٢ | ٣٤ |
| χ | X | ١١ | ٣٩ |
| O'P | O'a | ١٢ | ٣٩ |
| OP | O a | ٨ | ٤٠ |
| P_m | P_{max} | ١٣ | ٤١ |
| للحصول | بالحصول | الشكل | ٤٢ |
| (١ - ٩) | (١١ - ٩) | ٨ | ٤٤ |
| V_s | V_s | ٩ | ٤٤ |
| $\sqrt{3} I_s$ | $\sqrt{3} I_2$ | ١٢ | ٤٩ |
| R'_2 | R_2 | ١٧ | ٥٩ |
| ص ٢٣٢ | ص ١٣٢ | ٤ | ٧٧ |
| F.L.slip 0.02 | ناقص في المسألة | ٩ | ٨١ |
| (١ - ١٧) | (١ - ٤٦) | ٨ | ٨٢ |
| ١ (٢ - ٥) | أ (٢ - ٢٥) | ١٦ | ٨٣ |
| $a V_{31}$ | $a V_{23}$ | ١١ | ٨٤ |
| V_p | V_n | ١٣ | ٨٦ |
| والخلفي كما نحصل | والخلفي نحصل | ١٤ | ٨٦ |
| S_{f1} | S_{fe} | | |
| I_{f1} | I_{fe} | | |

| صفحة | السطر | الخطأ | تصويبه |
|------|--------------|---|---------------------------------------|
| ٨٨ | ١٧ | ص ١٦٨ | ص ٢٦٨ |
| ٩٠ | ٦ | في الطرف الايمن من المعادلة | $\frac{1}{2} J \omega^2_0$ |
| ٩٢ | ٧ | $J \omega^2_0$ | 57000×1000 |
| ٩٧ | ١٨ | I | I_{Ls} |
| ٩٧ | ٢١ | (٢ - ١) | (٢ - ١٠) |
| ١٠٠ | ١٦ | X | $X = \frac{1}{\sqrt{\frac{3}{3}}}$ |
| ١١٦ | نهاية الجدول | $P_1 + P_2$ | $P_1 - P_2$ |
| ١٢٠ | ٥ | باب | كتاب |
| ١٢٣ | ١٠ | المعدلات | المبدلات |
| ١٢٥ | ١٨ | ٢٠ إلى ٢٢ | ٢٣ إلى ٢٥ |
| ١٢٧ | ١٧ | I_n | I_u |
| ١٢٩ | الشكل (ج) | المرتحل المرتوم E_2 | صحتها E_r |
| ١٣٠ | ١٠ | متأخر | متقدم |
| ١٣٩ | ٧ | b | f_b |
| ١٤٦ | ١٢ | 2000 | 1000 |
| ١٤٨ | ٢ | القارات | القطارات |
| ١٤٨ | ٧ | 300 | 800 |
| ١٥٤ | ٢٥ و ٢٦ | توجد سجل زائدة ابتداء من (ذى الحلقات) في السطر ٢٥ حتى (للمحرك من) في السطر ٢٦ | تلقى هذه الجمل الزائدة |
| ١٦٠ | ١٩ | (٣ - ٥) | (٣ - ٤) |
| ١٦٩ | أسفل الصفحة | قائمة المراجع رقم (٥) | رقم (٢١) |
| ١٧٠ | شكل (٨ - ٣) | وضع الشكل | يدار ٩٠ درجة في عكس اتجاه عقري الساعة |
| ١٧٢ | ١١ | I_i | I_h |
| ١٧٣ | ٦ | < | ∞ (أى تناسب مع) |

| السطر | السطر | الخطأ | تصويبه |
|-------|--------------------|-------------------------|---------------------|
| ١٧٣ | ١٠.٩ | I_1 | I_h |
| ١٧٣ | ٢٠ | ٥٠ ذبذبة بدلا من ٦٠ | ٦٠ ذبذبة بدلا من ٥٠ |
| ١٧٤ | ٥ | مع ، | مع ، |
| ١٧٦ | شكل (١٢ - ٣) | الشكل مقاوب | يعدل |
| ١٧٨ | ١١ | I_8 | I_3 |
| ١٧٨ | ١٧ | $j \sqrt{3}$ | $-j \sqrt{3}$ |
| ١٨١ | العنوان | - Phases | - phase |
| ١٨٥ | ٧ (البسط) | $2 n_s + n - n$ | $2 n_s + - n_s$ |
| ١٩٣ | ١٢ | X_{20} | X_2 |
| ١٩٥ | ١١ | مقامه | مقاومة |
| ١٩٥ | ١٣ | (٩ - ب) | (٩ - ب) |
| ١٩٨ | ٩ | المعادلتين (٧-٤)، (٧-٤) | المعادلتين (١٣-٤) |
| ١٩٩ | ١١ | صغير s | صغير s |
| ٢٠٠ | ١٨ المعادلة (٤-١٣) | K.g.m. | Watts |
| ٢٠٠ | ٢٠ | (١ - ٤) | (٧ - ٤) |
| ٢٠١ | ١ | (٢ - ٤) | (٩ - ٤) |
| ٢٠١ | ١٤ | (٥ - ٤) | (١٤ - ٤) |
| ٢٠٣ | ٥ | المراجع | المراجع |
| ٢٠٤ | ٣ | الملف m | الملف a |
| ٢٠٤ | ٥ | E_{or} | E_{af} |
| ٢٠٧ | ١١ | من (٣-٤) الى (٦-٤) | من (٤-٤) الى (١٠-٤) |
| ٢٠٧ | ١٦ | 1157 | 117.5 |
| ٢٠٧ | ١٩ | 5 | 0.5 |
| ٢٠٨ | ١٠ | (١٨ - ٤) | (٢٣ - ٤) |
| ٢١٦ | السطر الأخير | ٢٠٠ | ٢٠٠٠ |
| ٢١٧ | ٩ | بعدين | بعديه |
| ٢١٧ | ٢١ | بعد | بعدا |
| ٢٢٣ | ٩ | يجب | لا يجب |

| صفحة | السطر | الخطأ | تصويبه |
|------|-------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| ٢٢٣ | ١٥ | عمق في | عمق المجرى في |
| ٢٢٦ | ١٩ | أ كبر | أ كبر من |
| ٢٢٨ | ١١ | $S/2$ | $S_2/2$ |
| ٢٢٩ | ٦ | $T_1 = g_1 p z_{s1}$ | $T_1 = \frac{1}{2} g_1 p z_{s1}$ |
| ٢٣١ | ٧ | ضغط | ضعف |
| ٢٣٢ | ١١ | للمقاومة | للمقاومة |
| ٢٣٦ | ٨ | $\lambda_{s2} = C_1 \frac{S}{3a} +$ | $\lambda_{s1} = 2 C_1 \frac{S}{3a} +$ |
| ٢٣٦ | ١٥ | $\lambda_{s1} = C_1 \frac{S}{3a} +$ | $\lambda_{s1} = 2 C_1 \frac{S}{3a}$ |
| ٢٣٨ | ٤ | h_2 | h_3 |
| ٢٣٩ | ١ | (٥ - ٥) | ١ (٥ - ٥) |
| ٢٣٩ | شكل (١)، (ب) | مقلوبان | يغلان |
| ٢٤١ | ٣ | X_{2s} | X'_{2s} |
| ٢٤١ | المعادلات | ناقص فيها العامل 10^{-8} | بضرب كل منها في 10^{-8} |
| | ٤ (٥ - ٣٠) | | |
| | (٥ - ٣١) ٤ | | |
| | (٥ - ٣٢) ٤ | | |
| ٢٤١ | المعادلة (٥ - ٣٢) | X_{s2} | X'_{2s} |
| ٢٤٤ | المعادلة (٥ - ٣٧) | ناقص فيها العامل 10^{-8} | تضرب في 10^{-8} |
| ٢٤٩ | ٢ | $q = \frac{72}{3 \times 8} 3$ | $q = \frac{72}{3 \times 8} = 3$ |
| ٢٥٠ | ٩ | gad | gap |
| ٢٥٠ | ١١ | 1 | 1.5 |
| ٢٥٢ | ٣ | ems | cms |
| ٢٥٢ | ٦ | cnrve | curve |
| ٢٥٢ | ١٧ | $0.3 B_g l_g k_g$ | $0.8 B_g l_g k_g$ |
| ٢٥٢ | السطر الاخير | 3200 | 320 |
| ٢٥٣ | ٥ | 077 | 0.77 |

| صفحة | السطر | الخطأ | تصويبه |
|------|-----------------|---|--|
| ٢٥٤ | ٣ | $2.9 \times \frac{4}{3} \times 3.1$ | $28.9 - \frac{4}{3} \times 3.1$ |
| ٢٥٤ | ٥ في المقام | 9.58 | 0.58 |
| ٢٥٧ | ١٩ | بالتغير اب | بالتغير ات |
| ٢٦٢ | ١٤ | الزيت | التزيت |
| ٢٦٧ | ٧ | بدون حمل | بالحمل |
| ٢٧٣ | ٤ | shant | shunt |
| ٢٧٥ | ١٧ | و هي | و هي السرعة الزاوية |
| ٢٧٦ | ١١ | $\frac{T \omega}{dt}$ | $\frac{d \omega}{dt}$ |
| ٢٧٩ | ٥ | T_i | T_1 |
| ٢٧٩ | ٥ | 1ε | ε_1 |
| ٢٨١ | المعادلة (٦-١٢) | $= J_m +$ | $J_d = J_m +$ |
| ٢٨٤ | ٩ | Janles | Joules |
| ٢٨٧ | ٤ | المسافة متر | المسافة h متر |
| ٢٨٩ | المعادلة (٦-٢١) | $\times \frac{365 \eta_0 P_0}{S_N}$ | $= \frac{365 \eta_0 P_0}{S_N}$ |
| ٢٩١ | ٨ | mofotor | of motor |
| ٢٩٢ | ٦ (المقام) | 320 | 32 |
| ٢٩٢ | ١٧ | الدوران بمفرده | الدوران بمفرده |
| ٢٩٤ | ١ (المقام) | T | T_1 |
| ٢٩٩ | قبل الأخير | ١ (٦-٢٧) | (٦-٢٧) ا و ب |
| ٣٠٠ | ٥ | esistance | resistance |
| ٣٠٢ | ٣ (البسط) | (0.2) ² | (1.2) ² |
| ٣٠٥ | ٤ | عنوان بدون خط تحته | يوضع تحته خط |
| ٣٢١ | ٤ و ٥ و ٦ | العبارة التي بين قوسين من (قائمة حتى الانزلاقية) وضعا خطأ | تأتي هذه العبارة بعد كلمة الحمل في السطر ٦ |

| صفحة | السطر | الخطأ | تصويبه |
|------|--------------------|--------------------------|-------------------------|
| ٣٢٤ | ١ (التكامل الثاني) | $\int \omega d\omega$ | $\frac{J}{T} d\omega$ |
| ٣٢٤ | ١ (التكامل الثالث) | $2 T_m \omega_m$ | $2 T_m \omega_m$ |
| ٣٣٥ | ١٥ | 0965 | 0.965 |
| ٣٤٨ | المعادلة (٩ - ٧) | + CW | $\pm CW$ |
| ٣٤٩ | ١٦ | $a = 5 \text{ Kg/ tons}$ | $r = 5 \text{ Kgs/ton}$ |
| ٣٥٧ | ١٦ | $b = 3.2$ | $b = 3.5$ |
| ٣٥٨ | ١ | 5.4 | 5.7 |
| ٣٥٨ | ٧ | هي | كما هي |
| ٣٦١ | ٩ | كدار | كدالة |
| ٣٦٢ | ١ | تيمة | قيمة |
| ٣٦٣ | ٥ | منتائج | النتائج |
| ٣٦٥ | آخر سطر | 1. | 1.4 |
| ٣٦٦ | ١٣ | ٣٦ | ٥٣٦ |
| ٣٧١ | ٧ | (٧ - ١٢) | (٧ - ١٢) |
| ٣٧١ | ٦ | J^D | T_D |
| ٣٧٧ | ١٧ | $T_{dI} + T_{dI}$ | $T_{DI} + T_{dII}$ |
| ٣٨٠ | ٩ | $T s$ | $sT \omega_j$ |
| ٣٩٢ | ٨ | 10 | ١٠٠ |

الترقيم الدولي ٧٨/٣٦٧٤
رقم الإيداع ٩٧٧ - ٧٣٠٧ - ٠١ - ٢

** تم بحمد الله **

طبع على مطابع
رواي للاطلاع
المصافرة . اسكندرية

٤٢٢/٢٨